



Changement technique et double dividende d'écotaxes

Un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique

Frédéric Gherzi

Thèse pour l'obtention du titre de Docteur de l'EHESS,
Programme doctoral *Analyse et Politique Économiques*.

Soutenue le 1^{er} avril 2003 devant :

M. Dominique Finon	(rapporteur)
M. Claude Henry	
M. Jean-Charles Hourcade	(directeur de thèse)
M. Jean-Christophe Pereau	(rapporteur)
M. Henry Tulkens	

Changement technique et double dividende d'écotaxes

Un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macroéconomique

Frédéric Gherzi

Thèse pour l'obtention du titre de Docteur de l'EHESS.
Programme doctoral *Analyse et Politique Économiques*.

Les travaux publiés dans cette thèse ont pu être menés grâce au co-financement de

l' ***Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie***



et de l'association

Entreprises pour l'Environnement.



Remerciements

La majorité des travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au CIREN, sur le campus du Jardin Tropical de Paris. Je tiens à remercier, en premier lieu, Jean-Charles Hourcade, directeur de cette thèse et seul maître à bord au CIREN; il a inspiré et supervisé la quasi totalité des travaux dont elle est composée, et a su par ses encouragements, et l'énergie de ses engagements me mener au bout de cette expérience.

Je veux remercier aussi l'ensemble des membres du CIREN, pour leur soutien scientifique (Renaud Crassous, Khalil Hélioui, Patrick Quirion, Tarik Tazdaït, Patrice Dumas) et administratif (Catherine Boemare, Naceur Ben Chabaane, Yaël Serfaty, Danny Tran et Éléonore Tyma), mais aussi pour leurs qualités humaines qui font du Jardin Tropical un site de recherche privilégié (ajoutez à cela le cadre bucolique...).

Je tiens encore à dire ma gratitude aux membres de *Resources For the Future*, Washington D.C., au premier rang desquels Michael Toman, pour la qualité de leur accueil tout au long d'un séjour qui s'est prolongé sur deux années, et a permis la mise au point du modèle SAP 12.

Enfin, pour la qualité de leur jugement, leur fiabilité et leur soutien sans faille, je remercie Thomas Audigé et Renaud Crassous, qui m'ont apporté une aide réellement déterminante dans les affres de la dernière ligne droite.

Introduction générale

En matière de politique environnementale, l'analyse économique recommande l'instauration d'une taxation des émissions polluantes, ou d'une mise aux enchères d'un quota de permis d'émission négociables—son équivalent par les quantités. L'argument sous-jacent est celui d'une maximisation de l'efficacité des mesures prises *via* une égalisation des coûts marginaux supportés par les émetteurs, égalisation que le recours à des normes techniques, des règlements contraignants, des accords de branche ou des normes d'émission ne permet pas.

La question de l'ampleur du produit de la réforme envisagée, et de l'usage qui peut en être fait, prend une importance toute particulière dans le cas du changement climatique : le phénomène n'est plus localisé mais mondial, et une alerte scientifique croissante (IPCC 2001) paraît justifier des niveaux de contrainte rendant tout à fait irréaliste l'hypothèse d'un recyclage dans de simples activités de réduction des émissions. Ces considérations conduisent au développement d'un ensemble de travaux économiques sur l'hypothèse d'un « double dividende » (Pearce 1991) des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre : outre le gain environnemental attendu, un gain économique pourrait être obtenu par le recyclage du produit des politiques dans un allègement des prélèvements les plus distorsifs *ex ante*. Les perspectives ainsi dégagées ne sont pas dénuées d'intentions politiques : l'incertitude pesant en cascade sur les bénéfices environnementaux d'une action concertée—effet des mesures sur les émissions, cycle du carbone, impact des concentrations sur les températures, les précipitations, la fréquence des accidents climatiques et évaluation ultime des dommages—perd de son effet dissuasif dès lors qu'elle n'est plus à mettre en balance avec le coût économique brut de cette action, devenu négatif.

Les premiers travaux numériques effectués dans un cadre d'inspiration keynésienne (Shackelton 1992, DG II 1992, Barker *et al.* 1993, Godard, Beaumais 1994) confirment la validité de l'hypothèse de Pearce, particulièrement si l'on considère un recyclage dans une diminution des prélèvements sur le travail pour l'Europe. Ils suscitent le développement d'une réponse en équilibre général néoclassique, menée à la fois sur les fronts analytique et numérique, qui conteste fortement leur optimisme. La confrontation des deux « écoles » permet toutefois la clarification d'un consensus que Goulder (1995) exprime dans un article de synthèse faisant date : à objectif environnemental donné, toute mesure non tarifaire conduit à un coût en bien-être supérieur à celui qu'implique une mesure tarifaire dont le revenu est recyclé par baisse des prélèvements obligatoires les plus distorsifs. En revanche, une incertitude subsiste sur le fait de savoir si le second dividende dû à ce recyclage est susceptible de conduire à un coût macroéconomique net négatif.

L'évaluation des politiques climatiques ainsi constituées renvoie en fait à une triple problématique.

Une controverse sur la réaction du système énergétique

L'ampleur du second dividende dépend de la réaction du système énergétique, principale source anthropique d'émissions de GES, aux signaux-prix : d'un côté une forte élasticité conduit à une évanescence de la nouvelle base fiscale, de l'autre elle minimise les coûts directs en bien-être sur les agents; enfin les coûts en capital sont un des paramètres majeurs de l'effet d'éviction sur les investissements dans l'évolution de la production d'autres secteurs.

L'étude de cette réaction butte sur un débat récurrent en matière de prospective énergétique, qui oppose les modèles dits « *bottom-up* », riches en information technologique, et les modèles macroéconomiques dits « *top-down* ».

À court terme la modélisation *bottom-up* tend à un certain optimisme en raison de la prise en compte d'*efficiency gaps*, tandis que les modèles macroéconomiques délivrent un message plus pessimiste en représentant des fonctions d'utilité plus complètes ou des coûts de transaction inhibant l'adoption des techniques les plus efficaces (Jaffe, Stavins 1994). À l'inverse, les modèles technologiques font apparaître des effets de saturation de l'innovation en cas de signaux prix élevés, qui ne peuvent être traduits dans le cadre des fonctions de production $Y = F(K, L, E, M)$ des modèles *top-down*. Les rares tentatives de couplage publiées à ce jour (de type MARKAL-MACRO) ne font qu'effleurer le problème, en maintenant une déconnexion entre les réactions du système d'offre énergétique et les fonctions de production du module macroéconomique général.

Une controverse de macroéconomie statique

L'intuition d'un double dividende au sens fort repose sur l'existence d'un cercle vertueux entraînant, par la baisse des coûts salariaux, une hausse de l'activité donc de l'embauche et en dernière analyse de la consommation des ménages. Les résultats d'un modèle d'équilibre général analytique simple (Bovenberg, De Mooij 1994a, 1994b; Goulder 1995) contrent cette intuition : une taxation écologique retombent en dernière instance sur les facteurs primaires de production, et son recyclage dans une baisse des charges sur ces facteurs ne fait que substituer leur taxation implicite à leur taxation explicite; comme elle induit en outre, contrairement aux taxations directes de ces facteurs, des distorsions des prix relatifs des biens finaux, elle provoque au total une

baisse d'utilité du revenu nominal, donc une contraction de la demande finale de biens et un recul de l'activité.

Mais un tel mécanisme ne bloque pas l'apparition d'un double-dividende fort dans des modèles empiriques en économie ouverte; ceci peut s'expliquer par le fait que ces modèles intègrent :

- plusieurs biens, des rentes sur la production d'énergies fossiles nationale ou importée, des revenus de transferts non négligeables (non-salariés, chômeurs et retraités) et un secteur informel. Les mécanismes de transmission en dernier ressort de l'impact fiscal sont alors fortement modifiés,
- un système fiscal *ex ante* sous optimal; concernant les charges sociales, le simple fait de prendre en compte une rigidité salariale et un chômage d'équilibre revient à retrouver un double-dividende fort à travers une baisse de la fiscalité sur le travail (Carraro, Soubeyran 1996).

À la confluence de ces deux problématiques, une controverse sur les liens entre choix techniques et productivité générale

Puisque des signaux prix de long terme sont destinés à transformer de façon durable les choix de consommation et de production d'énergie, ils ne peuvent pas ne pas avoir d'impact sur l'innovation et la productivité générale. Posé par Jorgenson dès 1981, qui avance l'idée d'une corrélation négative entre prix de l'énergie et productivité générale, ce problème est de fait ignoré par l'utilisation généralisée de fonctions de production à progrès technique exogène; dans un tel cadre la perturbation induite par une taxation des GES se traduit par un déplacement le long de fonctions de production inchangées, hypothèse peu tenable. Le débat a ressurgi sous la forme de l'étude des effets d'éviction sur la R&D et les mécanismes d'apprentissage de l'induction d'un progrès technologique biaisé. Il convient de savoir (Schneider, Goulder 1997) si cet effet d'éviction est susceptible, sur le long terme, d'annuler un éventuel double dividende apparaissant dans l'analyse statique.

L'objet de cette thèse est d'apporter des éléments de réponse à chacune de ces trois controverses, en proposant, au-delà de leur simple étude en parallèle, un cadre méthodologique intégré où la représentation de chacune d'entre elles est explicitée. Elle suit pour ce faire le plan suivant.

Son premier chapitre, un peu à part, reproduit sans altérations un article paru dans *The Energy Journal* (Hourcade, Gheri 2001) qui permet une quantification de l'incertitude entourant l'évaluation des politiques climatiques par des travaux sur les estimations des coûts du protocole de Kyoto de douze modèles mondiaux.

Ses chapitres II et III entrent dans le détail des sources de cette incertitude en campant le décor d'une double problématique : d'une part, une controverse macroéconomique concernant l'éventualité de l'obtention d'un dividende économique par la mise en place de réformes écofiscales; d'autre part, une controverse technique quant à la mesure de l'effet incitatif des signaux prix en matière de demande d'énergie, cristallisée dans l'opposition entre modélisation *bottom-up* et *top-down*.

Les quatrième et cinquième chapitres présentent le modèle d'équilibre général IMACLIM, spécifiquement conçu comme une tentative de réponse à ces controverses, selon des spécifications macroéconomiques intégrant une prise en compte explicite du changement technique induit, détaillées au chapitre IV, et par l'articulation avec la modélisation *bottom-up*, selon des modalités novatrices dont les conséquences sont explorées au chapitre V.

Les trois derniers chapitres proposent trois applications de l'outil développé en couplage avec le modèle *bottom-up* POLES, ou fonctionnant sur la base de pures hypothèses techniques. Le chapitre VI reprend les éléments d'une étude parue dans *Économie et Prévision* (n°143-144, 1^{er} trimestre 2000), qui propose à la fois des démonstrations d'ordre général concernant les impacts de paramètres clés dans l'évaluation numérique des politiques climatiques, et les résultats d'une application à la France mettant en lumière l'influence spécifique du changement technique. Le chapitre VII désagrége les résultats du chapitre VI sur 35 branches d'activité de l'économie française pour obtenir une mesure des impacts d'une taxe carbone sur la compétitivité de l'économie française; il explore ensuite les possibilités offertes par l'existence d'un régime international d'échanges de droits d'émission pour la mise au point de politiques mixtes permettant l'atténuation des impacts mis en évidence. Le chapitre VIII, enfin, étend les analyses proposées pour la France à 8 économies, en faisant ressortir l'importance de leur structure dans l'évaluation des impacts d'une politique climatique.

Chapitre I

**The economics of
a lost deal :**

**Kyoto - The Hague -
Marrakech.**

Paru dans *The Energy Journal*, volume 23, numéro 3, juillet 2002.

En collaboration avec Jean-Charles Hourcade.

Introduction

Many explanations can be given for the inconclusive outcome of the Sixth Conference of the Parties (COP6) to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): diplomatic misconduct, cumbersome negotiation machinery, lack of political will,¹ or intrinsic defects of the Kyoto Protocol (Victor 2001). This paper builds on the intuition that, besides such factors, uncertainty about the costs of meeting the 2010 carbon emission targets already defined at the COP3 Kyoto negotiations fueled the main controversies that blocked the agreement. It demonstrates that, on pure economic considerations, a compromise might have been reached, and derives some lessons for attempts at completing "Kyoto's unfinished business" (Jacoby *et al.* 1998) after the Marrakech accord or at moving on to a new framework.

If we view the information from the Energy Journal Kyoto Special Issue (Weyant and Hill 1999) as representative of the expertise available in the year 2000, the marginal cost of meeting Kyoto targets ranges from \$21 to \$225 a ton² in case of Annex B trading.³ In contrast, Annex B carbon abatement requirements show much less variation across the models.⁴ This degree of cost uncertainty has fueled two opposite concerns. The European insistence that flexibility mechanisms be supplemental to domestic carbon abatement action, leading to the advocacy of a "supplementarity condition" under Article 17bis, stemmed from the fear that because of low abatement costs and the excess emissions quotas assigned to Russia and Ukraine, carbon prices with unlimited Annex B trading might not reflect the long-term value of a significant carbon constraint (Ha-Duong *et al.* 1999); in other words, carbon trading might become a way of escaping real efforts. The opposite concern was expressed by Japan, the United States, Canada, Australia, and New Zealand (JUSCANZ): that the costs of

¹ For an overview of a European Union perspective, see Gupta and Grubb (2000) and Metz and Gupta (2001).

² Throughout this paper, marginal costs are \$1990 U.S. per metric ton of carbon in 2010.

³ Throughout this paper Annex B and article numbers refer to Annex B and articles of the Kyoto Protocol (UNFCCC 1997).

⁴ The five standard deviations across models of reductions required—"business as usual" 2010 emissions minus Kyoto targets—for five Annex B-covering zones (see below) range only from 3 to 13 % of their averages, while the slopes of linear approximations of the abatement cost curves show a standard deviation of 60 to 100%: the uncertainty on responses to a given price signal seems to significantly exceed the one about baseline emissions.

meeting the Kyoto commitments could be high enough to undermine the economic and political viability of the system. It led the JUSCANZ group to question the Kyoto targets, at least implicitly, and to advocate options for hedging against the risks of excessive costs.

To analyze the effects of cost uncertainty on potential Kyoto outcomes, we developed SAP12 (Stochastic Assessment of Climate Policies), a model integration tool incorporating harmonized reduced forms of twelve global climate-economy models. The models encompass various degrees of optimism and pessimism about key factors underpinning negotiation stances. Policymakers have valid reasons for regarding the distribution of these models' results as representing the uncertainties found in the real world (rather than considering each of them as an independent best guess).⁵ This is why, despite some Delphi process in the runs used to produce our reduced forms, a probabilistic interpretation of SAP 12 results can be given in the form of "likelihood ranges" (see Box 1).

Using 1999 data, SAP 12 enabled us to analyze different packages of negotiation options under different values of such parameters as compliance payments, supplementarity constraints, "share of the proceeds" paid to developing countries, and carbon sequestration, with a view to delineating the range of possible compromise positions provided by the packages given competing views at COP6. Incorporating the latest information about emissions trajectories, SAP 12 also made it possible to analyze whether the subsequent Marrakech accord responds to the main concerns pervading the COP6 negotiations.

We first clarify some conceptual ambiguities about compliance costs and explain why the supplementarity quarrel cannot be treated independently of the content of compliance systems. The second section, focusing on environmental performance and costs of different policy options, delineates the range for possible compromise among Annex B (developed) countries, excluding extended sequestration activities under Article 3.4. The third section compares such possible compromises with those including the expanded sequestration option, and the fourth section examines the potential financial flows to the developing world. A final section demonstrates that the Marrakech accord, the new benchmark of climate policy discussions, leaves unresolved the key structural questions of the climate policy regime.

⁵ Unless otherwise stated, the results reported below assume equiprobability between models.

I. Conceptual ambiguities behind the negotiations

The pre-COP6 process was shaped by divergences among Annex B countries on compliance costs and supplementarity, divergences that overshadowed more fundamental long-run contradictions between the Annex B and G77 groups. The failure to narrow these divergences was due, in part, to the very negotiation language—casual rhetorical compromises that blurred real economic issues. A detour through some conceptual clarification is thus necessary to minimize the risks of repeating such rhetorical deadlocks.

I.1. The main dividing line: compliance costs and supplementarity

The concern behind the supplementarity condition can be introduced by noting that six of the SAP12 models give a 2010 price lower than \$30 per metric ton of carbon (/tC) for full Kyoto compliance if all Kyoto flexibility mechanisms are implemented: credit trading and project-based joint implementation (JI) among Annex B (developed) countries; and project-based Clean Development Mechanism (CDM) with non-Annex B (developing) countries. These results are all the more significant in that they do not incorporate the further price-deflating effect of carbon sinks. Arguably, such low carbon price levels may fail to create the appropriate incentives for longer-term infrastructure adaptation and research and development, and thus may make ambitious targets beyond the first commitment period much more costly (Lecocq *et al.* 1998).

The model integration tool SAP12 (Stochastic Assessment of Policy, 12 models) incorporates reduced forms of the marginal abatement cost curves of 12 major climate-economy models. The curves are constructed by backward calibration from data published in *The Energy Journal* Kyoto Special Issue (Weyant and Hill 1999) for 10 of them and from the modelers themselves for POLES and WAGEM. Five of these models are American (MERGE 3.0, MIT-EPPA, MS-MRT, RICE and SGM), two Australian (ABARE-GTEM and G-Cubed), one Japanese (AIM) and four European (Oxford Model, POLES, WAGEM and Worldscan). All models were peer-reviewed either by members of the Stanford Energy Modeling Forum or by the International Panel on Climate Change for its *Third Assessment Report* (IPCC 2001).

Given the available data, calibration has been made in a consistent manner for four zones—the European Union, the United States, Japan, and the remaining non-Eastern European Annex B countries in the CANZ group. With simple assumptions, curves were then derived for the Economies in Transition (EIT) and the Clean Development Mechanism (CDM) potential from the Annex B- and Global trading equilibria. For a given model, the resulting set of six curves allows the computation of a market equilibrium under various assumptions regarding the implementation of the flexibility mechanisms.

Note that the resulting marginal costs correspond to levels of lump-sum recycled carbon taxes inducing a given abatement. Thus, they embody not only assumptions about technical costs but also the macroeconomic feedbacks as described in each model. Accordingly, "Total costs" are derived by integrating below the curves for domestic costs and adding the volume of imports priced at the international equilibrium price (all runs suppose an international market of emissions credits resulting from the three flexibility mechanisms).

The underlying methodology is grounded in the premise that policymakers can interpret the variance in results from the 12 models as revealing uncertainty in the real world regarding key parameters of cost assessment, such as technical change and behavioral reactions to policy signals. A conventional stochastic treatment is thus applied:

SAP12 runs each of the models separately and provides an expected value of basic economic and environmental indicators for the policy packages tested. Perhaps more importantly, we derive from its comprehensive results (a) the percentage of chance for each indicator to be above or below a certain value, given some subjective probability attached to the results of each model (in most of the runs we will assume equiprobability or an equal level of confidence); and (b) the likelihood ranges, used for most of the results reported, whose bounds are the average of the 12 results minus and plus the standard deviation observed: a 16–45% domestic action in a region under a given policy means a 30.5% average, with a 15.5% standard deviation.

A detailed technical description of SAP12, with full reference to the models listed, is available at <http://www.centre-cired.fr/actualite/SAPdesc.pdf> [cf. annexe I.1]

Box I.1 Model integration tool.

Similarly, percentages of domestic abatement on total abatement required for full compliance as low as 16–45% in the United States, 12–32% in the European Union, and 10–28% in Japan with full global trading might fail to trigger significant learning-by-doing in carbon abatement.

In May 1999, to address these concerns, the European Council of Environmental Ministers proposed concrete ceilings to limit carbon imports under Kyoto flexibility

mechanisms according to two alternative formulas,⁶ plus a "however" clause resulting *de facto* in a 50% ceiling. Pronk's package⁷ avoided such numerical precision, stating that parties "shall meet their emission commitments *primarily* through domestic action since 1990", but it was interpreted by JUSCANZ delegations as an implicit 50% ceiling.

The results of the SAP 12 models also fuel concerns about excessive compliance costs. In a no-trade case, carbon prices higher than \$250/tC are given by 33% of the models for the United States and the European Union, and 67% for Japan. Simulating a "full-trade" (all flexibility mechanisms implemented) scenario significantly lowers the cost range: only one model gives an international carbon price higher than \$100/tC. However, as Weyant and Hill (1999) point out, carbon markets may not operate perfectly and gains from the three flexibility mechanisms can be reduced by administrative costs, costs of monitoring, or particularly of project selection and certification for JI and the CDM. Thus, a set of realistic (some will say optimistic) assumptions regarding transaction costs⁸ results in a 50% chance (based on the SAP 12 results) that the international carbon price will exceed \$100/tC.

To mitigate cost concerns, two alternative approaches have been advocated:

- A predetermined dollar-per-ton payment by which parties can cover their excess emissions and stay in compliance (Kopp *et al.* 1997). Such a provision creates a "safety valve" against excessive marginal costs while still allowing for the possibility that the Kyoto objectives be met cheaply, thus shifting from the strict quantity approach of assigned targets to a hybrid quantity-price approach. The original proposal was refined into a "restoration payment", with the funds collected—either by a national authority, or by an international body, the choice resulting from a political bargain—recycled in further abatement

⁶ Net carbon importers must respect the least constraining of two ceilings: option A, 5% of the average between five times their base-year emissions and their assigned amount; and option B, 50% of the difference between five times their emissions in any given year between 1994 and 2002 and their assigned amount. But they can benefit from the "however" clause. Net exporters are subject to the 5% limit without alternative.

⁷ We define "Pronk's package" as the document distributed at the Hague by Jan Pronk, president of COP6, titled *Note by the President of COP6—23 November 2000* (UNFCCC 2001, p.4).

⁸ All of the SAP12 results reported in this text use an identical quantity approach to those costs: export volumes were reduced to two-thirds of their unconstrained full-trade level for the Economies In Transition (EIT), and to one-fourth for the Rest of the World—a figure slightly higher than the 15% retained in Weyant and Hill (1999) for the share of the CDM potential likely to concretize. EIT and CDM cost curves were reassessed accordingly.

during a "true-up" period through a reverse auction mechanism⁹ (CIRED-RFF 2000).

- The extension of carbon sequestering activities eligible under Article 3.4, which increases the availability of "cheap" tons in Annex B countries.

Typical of the difficulty in crossing the political dividing lines within Annex B, those options were perceived by the European Union as reducing domestic action in the energy sector and thus exacerbating the supplementarity concern. However, the second approach keeps within a strict quantity-based instrument pool and simply changes the accounting rules, while the first approach combines quantitative targets with a hedging mechanism.

1.2. Private and social costs: the overlooked distinction

Controversies about the level of compliance costs often ignore the distinction between net total social costs and carbon prices. High carbon prices may indeed prove politically problematic, increasing the prospect for compliance default if they exceed the willingness of energy consumers to pay for climate mitigation.¹⁰ Extensive experience demonstrates that energy consumers are much more sensitive to the gross signal of energy prices than to the net impact including less tangible economy-wide compensating effects, such as the recycling of the proceeds of a carbon tax or auctioned tradable emissions permits. This is why motorists or carbon-intensive industry can block measures like environmental fiscal reforms, even though these measures are supposedly Pareto-improving in specific circumstances.

⁹ In a reverse auction, each project is proposed at a given price per ton of carbon, but all the selected projects will receive the same price. The tonnage of selected projects valued at this price clears the collected funds; to be selected, a project must be priced lower than the clearing price.

¹⁰ We do not strictly use the notion of "willingness to pay" in the classical sense of revealed preference for the benefits of long-term greenhouse gas abatement. Rather, we refer to a political limit on the willingness to bear a certain level of short-term cost for precaution. Note that the latter notion may well be less restrictive than the former, which available empirical studies set at a level much lower than those we consider in this text.

As noted earlier, carbon prices may be high in certain circumstances, provided they equate the marginal cost of carbon control. However, Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change Third Assessment (Metz *et al.* 2001) indicates that the total social cost of carbon control may be more tolerable: gross domestic product losses for meeting Kyoto targets would range between 0.2% and 2% in a no-trade case and in the absence of carbon sequestration; they could be halved through the Kyoto flexibility mechanisms within Annex B, and could even be lower through use of the CDM or possibly turn into a gain, with a judicious use of revenue-raising instruments¹¹.

Governments seeking to stay in compliance even with high carbon prices could "socialize" compliance costs by funding carbon permit imports through public expenses, rather than letting energy prices bear the full brunt of the carbon constraint. However, annual carbon imports reaching billions of dollars¹² would affect trade balances,¹³ and the concentration of these transfers to one or two main carbon permit exporters might entail unacceptable geopolitical risks. The only alternative is a subsidy to domestic abatement. Ultimately though, both options entail higher welfare costs than a purely price-triggered compliance.

1.3. Paradoxes regarding compliance systems

At COP6, Pronk's package proposed that excess emissions in the first compliance period be subtracted from the second budget period quota negotiated in 2005, with a 1.5 penalty factor that should "be increased by 0.25 after the subsequent commitment period [if still needed]." In economic terms this constitutes a *borrowing facility* with

¹¹ The IPCC WG III report underscores some limitations in these findings, in particular the fact that simulations are made under the assumption that markets operate perfectly and that savings from carbon markets and from tax recycling are not systematically additive. What matters though is the fact that the aggregate macroeconomic costs can be viewed as moderate in policy debates, while the marginal costs reach more striking figures.

¹² 8–22, 4–26, and 2–11 billions of 1990 U.S. dollars annually for the European Union, the United States, and Japan, respectively, under a full-trade, full-compliance hypothesis, including transaction costs.

¹³ Models representing trade and capital flows point out the impact of transfers on the exchange rates of currencies (McKibbin *et al.* 1998).

the penalty as an interest rate. However, this form of compliance payment will not be effective in practice given the Kyoto system. Consider a country whose consumers show a political willingness to bear a \$100/tC carbon price, while full compliance requires a \$150/tC carbon price. Under the threat of (say) a \$200/tC compliance penalty, a government acting in good faith will use public funds to support domestic action and pay for imports at \$150/tC rather than risk the \$200/tC penalty. Conversely, a bad-faith government—having taken the risk of deliberate noncompliance facing a \$150/tC price rather than confront its taxpayers—will logically not change its position for a \$200/tC payment.

In fact, any economically credible compliance system would require a threat beyond the internal rules of UNFCCC. An obvious solution would be the World Trade Organization (WTO) legitimating trade barriers against countries not in compliance with global environmental treaties. But because a linkage between UNFCCC and WTO has not been considered so far, an option of Pronk's sort appears the only possible compliance provision.

This has a critical implication for the benchmark with which negotiation packages should be compared. A scenario in which governments socialize the costs of meeting the targets regardless of their extent assumes a form of "Candide" conduct.¹⁴ A more realistic assumption is that even good-faith governments will take full advantage of the flexibility in legal provisions.

1.4. The real terms of the supplementarity problem

The preceding sections force reconsideration of the terms of the supplementarity quarrel.

First, the transaction costs associated with CDM credits raise the international carbon price and thus considerably reduce the prospect that a 50% limit on carbon imports would be breached. SAP 12 model results shown in Table I.1 (columns 1 and 2)

¹⁴ Candide is a character from Voltaire, a naïve young man who, though a repeated victim of the common flaws of human nature, sticks to the very end to his overly optimistic mentor's teaching that "everything is the best in the best of the world"—that is, everybody's conduct is good-faith conduct.

indicate this prospect disappears altogether for the United States, seems low for the European Union, and is significant only for Japan—an unsurprising result, since all models reveal a steeper marginal cost curve in Japan than in the other zones. Second, governments may consider the hidden cost of foreign carbon payments, including terms of trade concerns and geopolitical concerns about large transfers concentrated on one or two exporters. Column 3 in Table I.1 provides results assuming a 30 percent hidden cost multiplier,¹⁵ in which case domestic action very likely will exceed the symbolic 50%. A closer scrutiny of detailed results gives a 100%, 92%, and 42% probability for such an outcome for the United States, Europe, and Japan, respectively. Third, these odds are even higher if one accounts for the possibility of substantial exercise of market power by an EIT coalition (column 4),¹⁶ although their market power is limited by the competing supply from CDM projects.

	"Full Trade" w/o transaction costs	"Full Trade" with transaction costs,...	...a 1.3 shadow price of the currency,...	...and the EIT Stackelberg leader
European Union	12–32%	43–65%	45–68%	47–71%
United States	16–45%	58–85%	61–89%	64–91%
Japan	10–28%	33–55%	35–58%	36–59%
Market price	\$6–74	\$39–204	\$32–169	\$34–176

Table I.1 Share of required abatement operated domestically (domestic abatement) under full compliance.

It thus appears that the supplementarity issue vanishes as more realistic assumptions are made regarding market conditions, provided the CDM does not encompass a large amount of sequestration. However, the issue resurfaces through a different channel:

¹⁵ This value, commonly found in macroeconomic literature (Malinvaud et Guesnerie 1984), is purely indicative. It should be differentiated according to importing zones and their geopolitical concerns. Note that the existence of the hot air moderates the impact of the shadow price of imports : consider one importer with target T and abatement cost $p=aA$, and an exporter with abatement cost $p=b(I-H)$, where H is hot air. Compliance yields $\frac{\partial A/T}{\partial b} = \frac{T-H}{T} \frac{a}{(a+b)^2}$ and a

variation in b (e.g., including the shadow cost of imports) has little impact on domestic abatement.

¹⁶ The impacts of EIT forming a coalition were modeled assuming EIT acted as a Stackelberg leader in the emission credit market, setting their profit-maximizing sale volume with perfect knowledge of abating potentials in other zones. The profit maximization is static, disregarding speculations about future carbon prices and the resulting potential banking of EIT credits.

Table I.2 displays how domestic action drops if one makes the realistic assumption that governments take advantage of the possibility of postponing abatements in the face of politically uncomfortable carbon prices. Three levels of Annex B-wide political threshold prices are considered here, \$50/tC, \$75/tC, and \$100/tC. The contraction of domestic abatement is striking: if the EIT do not form a coalition the expected value of domestic action falls below 50% for the European Union under a threshold price as high as \$100/tC. At \$50/tC WP, the expected value falls below 50% for the United States too, as does the entire likelihood interval for the European Union and Japan. The ability to postpone abatement is thus confirmed as a major threat to significant domestic effort. The assumption of EIT market power does not significantly change this result.¹⁷

		Candide (No postponement)	With postponement...		
			...beyond \$50	...beyond \$75	...beyond \$100
European Union	C	43–65%	22–43%	30–53%	34–59%
	<i>O</i>	<i>44–68%</i>	<i>22–43%</i>	<i>30–53%</i>	<i>35–61%</i>
United States	C	58–85%	27–65%	39–74%	47–78%
	<i>O</i>	<i>61–87%</i>	<i>27–66%</i>	<i>39–75%</i>	<i>48–80%</i>
Japan	C	33–55%	15–41%	21–48%	26–51%
	<i>O</i>	<i>34–57%</i>	<i>15–41%</i>	<i>21–49%</i>	<i>26–52%</i>
Market price	C	\$39–204	\$47–52	\$59–80	\$64–105
	<i>O</i>	<i>\$41–215</i>	<i>\$47–52</i>	<i>\$60–80</i>	<i>\$66–106</i>

**Table I.2 Domestic abatement under limited willingness to pay (WP)
(without shadow cost of imports).¹⁸**

II. Annex B compromise space *without* extended activities under Article 3.4

Let us now turn to the analysis of various compromise packages. Among these packages, we consider two options addressing the criticism that a concrete ceiling exacerbates risks of excessively high compliance costs: as an amendment, a waiver that operates when domestic costs exceed a given level; and as a substitute, a per-ton

¹⁷ In Table I.2 as in others below, the O (oligopoly) row in italic and light script assumes the EIT exert their market power (cf. footnote 16), as opposed to the C (competition) row.

¹⁸ The shadow costs of imports are drastically lower than in the Candide case because beyond a certain price per ton, postponements have been substituted for imports.

import charge levied by parties on their acquired emissions credits. For the sake of clarity, we report results under *Candide* conduct (complete compliance, no postponement) before those with more realistic behavioral assumptions.

II.1. *Supplementarity and compliance costs under Candide conduct*

We first analyze the consequences for supplementarity of a 50% concrete ceiling on buyers.¹⁹ Regardless of a possible EIT coalition, such a condition has a significant impact only on Japan, restraining its imports for seven of the SAP12 models. Table I.3 displays a lower-bound increase of 12 percentage points for Japanese domestic action. The increase is only 4% for Europe, but the United States shows a decrease: reduced Japanese demand results in a slight decrease in international carbon prices, causing those countries or zones with marginal costs not constrained by the ceiling to increase their imports. All in all, with a competitive market, a 50% condition increases Annex B abatement by an average of only 3.7 MtC. If the EIT form a coalition, Annex B abatement is even more stable, showing a 2.0 MtC increase.

		Unrestricted compliance	50% concrete ceiling	50% ceiling + waiver \$75	50% ceiling + waiver \$100
European Union	C	45–68%	49–66%	47–68%	49–67%
	O	47–71%	50–69%	47–70%	50–70%
United States	C	61–89%	60–88%	61–89%	61–88%
	O	64–91%	63–89%	64–90%	63–90%
Japan	C	35–58%	47–57%	37–58%	39–58%
	O	36–59%	48–58%	39–59%	40–59%
Market price	C	\$32–169	\$30–168	\$32–169	\$31–168
	O	\$34–176	\$32–175	\$33–176	\$33–176

Table I.3 Percentage of domestic abatement with European ceilings on buyers.

¹⁹ The proposition of a concrete ceiling on sellers was soon dropped because it gives market power to carbon exporters, with results (not reported here) similar to those assuming the EIT exert their market power. The 50% ceiling or "however clause" is, however, a more lax constraint than option A (see footnote 6) in all cases, and more lax than option B in 46 of 48 cases, the only exceptions being the United States and CANZ group in one scenario. Estimates for option B are derived from Baron *et al.* (1999).

The deflating effect on carbon prices explains why the likelihood range of total compliance costs (domestic abatement expenditures plus carbon imports) does not change for the European Union, increases only by 3.8–3.1% in Japan, but decreases by 4.2–0.4% for the United States.²⁰

These findings suggest that the dispute about a concrete ceiling is mostly rhetoric under a *Candide-conduct* assumption: the option dramatically increases neither domestic action, as hoped by its proponents, nor the total burden, as feared by its detractors. Rather, it has the paradoxical but explicable outcome of placing more burden on Japan and making the United States better off.

The span of the discrepancy between the constrained and unconstrained scenarios explains why adding a waiver to the concrete ceiling has little numerical impact: it decreases both the extra burden for Japan and the United States gain. However, the total of domestic abatement in the importing parties increases only by an average 0.4% for a \$100/tC waiver.

The economic logic of an import charge is different, since it necessarily increases domestic effort in all countries for all scenarios—the paradox that occurred with ceilings regarding the United States disappears. However, its effect *vis-à-vis* supplementarity is significant only with high charges: the overall improvement is a 0.8–1.1% shift with a \$5/tC charge, and 2.0–2.3% and 3.4–3.4% shifts for \$10/tC and \$15/tC, respectively. Still, this is superior to the 0.2–0.4% obtained under a concrete ceiling plus a \$100/tC waiver.²¹

²⁰ For detailed results on costs see Table 3b [cf. annexe I.2]. An EIT coalition has a strong impact on them: imposing a ceiling on imports forces a form of collusive action that benefits the importers (Ellermann and Wing 1999). Lower bounds for total costs decrease by as much as 15.9% (for the United States), higher bounds by 11.2% (for the European Union), falling back to levels very close to those assuming perfect competition in carbon markets.

²¹ This modest result is due to transaction costs impairing the flexibility mechanisms. The impact would be more substantial with high amounts of cheap sequestration in the CDM. For detailed results see Table 3c. under http://www.centre-cired.fr/actualite/site_cired.htm [cf. annexe I.2].

II.2. Suplementarity and compliance costs under realistic behavior

Let us now turn to the assumption that even good-faith parties, facing a limit on their consumers' willingness to pay, will take advantage of the compliance provision of Pronk's package by postponing abatements that would imply too high domestic energy prices.

II.2.1. Ineffective suplementarity tools

Under this assumption, neither a 50% concrete ceiling nor an import charge significantly increase domestic abatement, regardless of whether the EIT form a coalition or not:

A 50% concrete ceiling operates only in zones or countries that simultaneously have a domestic effort below this level *and* face a compliance carbon price lower than the consumers' willingness to pay. With a \$100/tC WP, these conditions occur in 9 cases of 48, and under a \$50/tC WP, in 2 cases. The largest upward shift of the likelihood interval for the Japanese domestic effort occurs at \$100/tC WP, but it is offset by the opposite impact on the United States, because of the price deflation in the international carbon market explained above. On average, the total tonnage of domestic abatement in the importing zones shifts only by 0.2%, 0.5%, and 0.8% for WP of \$50/tC, \$75/tC, and \$100/tC, respectively.

An import charge increases domestic abatement only when the carbon price is lower than the WP: a \$10 charge over a \$100/tC WP causes a 3 percentage point shift in the likelihood range for domestic abatement for all zones. However, when the WP is binding, imports cease at a marginal price equal to the WP minus the import charge. Thus total abatement decreases, since domestic abatement is unchanged.

II.2.2. The suplementarity effect of restoration payments

A restoration payment (RP) set at the same level as the WP of private agents dramatically increases the risk of excessive foreign transfers for importing countries: even if the funds are collected nationally, the cheaper projects selected through a reverse auction (see footnote 9) will likely be in developing countries, Russia, and Ukraine. As stated earlier, it is impossible to predict how the shadow price of carbon imports considered in public policies might evolve. We can say that the multiplier

associated with the cost of carbon permit imports that equates the total foreign transfers under an RP regime to those obtained without such payments and a zero shadow cost of carbon imports is 2.4 to 3.7 for a \$50/tC RP and still 1.4 to 1.7 for a \$100/tC RP.

Table I.4 indicates the order of magnitude of how a 1.3 multiplier²² applied by all Annex B zones affects domestic action. Compared with Table I.2, likelihood intervals for domestic abatement shift upward by 3% to 10%. The same supplementarity effect appears in the tonnages of domestic abatement by importing zones, with 24–16%, 19–11%, and 11–7% increases for \$50/tC, \$75/tC, and \$100/tC WP, respectively.

Of course, this higher domestic abatement, while maintaining the level of marginal effort, comes at some expense in terms of total costs—all the more so when the WP is low, since it implies a greater number of tons to be covered by the RP. On average, total costs of importing zones increase by 70%, 36%, and 17% for a \$50/tC, \$75/tC, and \$100/tC RP, respectively. This is significant compared with a scenario with no compliance payment. However, it does not contradict the purpose of the restoration payment, since it lowers costs by 44%, 28%, and 19% compared with a Candide full-compliance scenario.

		RP \$50	RP \$75	RP \$100
European Union	C	28–50%	35–61%	38–65%
	O	27–51%	35–62%	39–67%
United States	C	34–75%	47–81%	53–82%
	O	34–75%	47–83%	54–84%
Japan	C	18–47%	26–52%	29–54%
	O	18–48%	26–53%	30–55%
Market price	C	\$44–53	\$52–80	\$53–98
	O	\$44–53	\$53–81	\$55–100

**Table I.4 Domestic effort under restoration payments
with 1.3 shadow cost of imports.²³**

²² Contrary to the Candide case, under a restoration payment a shadow price will necessarily induce increased public spending—subsidies to carbon-efficient technologies, investment in infrastructures—since any diminution of the imports through a tax would be exactly compensated for by increased restoration payments.

²³ Again, the EIT's behavior does not impact on results in a significant way. This is true of most of the market configurations in which CDM projects restrict the scope for oligopolistic behavior. From this point onward, for the sake of clarity and space, we will stop reporting and commenting on the coalition case, turning back to them only when we assess the Marrakech accord.

A restoration payment thus significantly makes up for the absence of compliance payments or of border taxes on non-complying countries: good-faith governments can guarantee consumers a maximum energy price increase and have a rational incentive to adopt public policies to attenuate both geopolitical risks and the pressure on their current account, without incurring a dramatic additional macroeconomic burden. Devised to address the concerns of the pessimists on costs, this tool is demonstrated also to be useful in promoting domestic action.

Perhaps more importantly, the distinction between a good-faith and a bad-faith government will immediately be apparent, since the latter will not make the restoration payment. In its absence, on the other hand, both types are indistinguishable at the start (both use the postponement capability). In the long run a bad-faith government will act only if the political cost of its cumulative environmental debt becomes significant, though as the total postponed tonnage reaches excessively high levels, the debt will be downgraded and the corresponding abatement definitively abandoned. This outcome is observed repeatedly in the case of conventional economic debt, so there is no reason why it should not occur in the case of an environmental debt.

II.3. Environmental assessment of compromise packages

Despite the significant complementarity effect of a restoration payment, it is still uncertain whether any particular price cap would be acceptable to those who seek environmental integrity as well as to those who emphasize cost control.

Judgment on environmental integrity under a non-Candide scenario depends on the level of confidence attached to the making up of postponed abatement. One easy indicator of the risk of ultimate default is the total tonnage postponed: 291 MtC under a \$50/tC WP, and still 104 MtC for a \$100/tC WP (with upper bounds of 741 and 572 MtC, respectively), when the likelihood range of the overall abatement required to meet the Kyoto targets is 810–1,077 MtC.²⁴

²⁴ Those figures stand regardless of the EIT's market power: either the WP is binding in the competitive equilibrium and it is too in the oligopolistic case; or it is not, and remains so in the oligopolistic case because of the CDM competition. In the latter case, abatement in the importing zones is simply substituted to abatement by the EIT.

As noted earlier, none of the supplementarity tools envisaged improve significantly upon this result, whereas a restoration payment lowers the risks of endlessly postponed abatement by prepaying part of the restoration. However, placing an upper bound on carbon prices comes at the expense of a gap between targeted and real environmental performance. A measure of this gap is shown in fig. I.1, which displays the likelihood interval (shaded boxes), extreme bounds (dashes) and median values (crosses) of emissions for various levels of willingness to pay with and without the RP.

The gain from an RP provision can be seen from the downward shift of the likelihood intervals of environmental performance for various levels of willingness to pay. A \$100/tC RP secures a high probability of meeting the Kyoto targets, and the chance is still 50% with a \$75/tC RP (the median is close to the Kyoto level).²⁵ With a \$50/tC RP there is still a good chance of abating to 1990 levels, but meeting the targets is much more uncertain (25%). It follows that a negotiable range of RP levels could be between \$75 and \$100 per ton. Although this is not a very wide range, it can be enlarged from two perspectives.

First, to facilitate full ratification, abatement objectives more lax than the Kyoto targets might be accepted. For example, Dominique Voynet, France's environment minister, declared: "...what really matters: to begin reducing emissions.... starting from there, the reduction level, be it 1% or 5%, is not essential" (*Le Monde* 21 April 2001). The 1% reduction could correspond to a stabilization of emissions from the energy sectors at 1990 levels plus a 1% sequestration by carbon sinks.²⁶ Following fig. I.1 it would be consistent with a \$50/tC RP, and indeed even with a \$35 level—the lower limit for a 50% chance of reaching the redefined target.

²⁵ The extension of some likelihood intervals beyond the Kyoto targets is a pure artifact. Models do not consider any sort of overshooting, and the fact that the standard deviation around the expected value reaches below Kyoto simply indicates that the underlying probability distribution is biased in that direction.

²⁶ A 1% reduction below 1990 levels is still compatible with keeping greenhouse gas concentrations under a 450 ppm level (Ha-Duong *et al.* 1997, 1999).

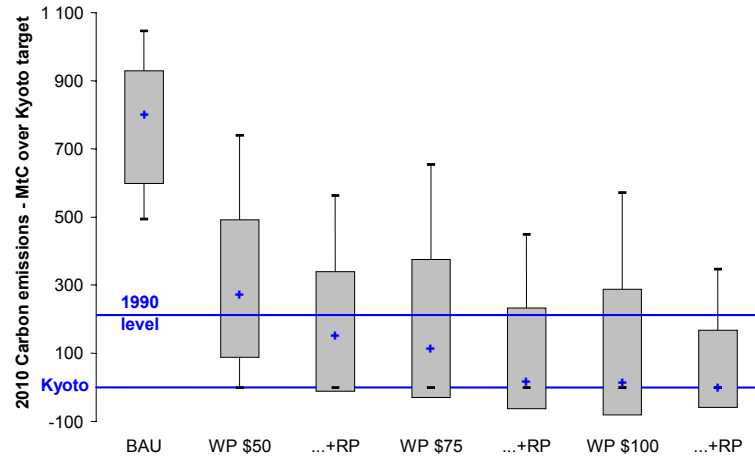


Figure I.1 Effect of restoration payments on environmental integrity.²⁷

A second perspective assumes that the European Union is consistent with its concerns about low prices and gives more credibility to optimistic models. Table I.5 displays how probabilities of reaching both Kyoto and 1990 levels evolve from a neutral stance to an optimistic stance, obtained by weighting model results before averaging them, with the following multipliers: 1 for the four most pessimistic model results, 2 for the four medium, and 3 for the remaining four.

	Neutral stance		Optimistic stance	
	Models reaching Kyoto commitments	Models keeping emissions below 1990 levels	Models reaching Kyoto commitments	Models keeping emissions below 1990 levels
RP \$35	8%	50%	13%	67%
RP \$50	25%	75%	50%	83%
RP \$75	50%	83%	67%	92%
RP \$100	75%	83%	83%	92%

Table I.5 Distribution of modeling results on environmental integrity under a restoration payment.

Chances of meeting the Kyoto targets with a \$50/tC RP switch from 25% to 50%, with the more lax target quite guaranteed (83% chance). Besides, the \$35/tC level yields a

²⁷ Again, the results presented do not depend on whether the EIT exert their market power or not (see footnote 23).

67% chance of meeting the relaxed target, and the odds of meeting the Kyoto targets improve slightly, from 8% to 17%.

III. Annex B compromise space *with* sequestration under Article 3.4

Let us now turn to the option of increasing carbon sequestration in Annex B under Article 3.4. as a way to control compliance costs, alleviate the burden on the energy system and reduce the international transfers required for compliance.

To discuss this option as opposed to a restoration payment, we compared levels of both options leading to the same expected value of compliance costs. The cost of carbon sequestration is generally expected to be far lower than that of carbon abatement in the energy sector. However, there is a significant difference between engineering methods of cost-assessment lying behind available cost curves for sequestration potential under Article 3.3 (Metz *et al.* 2001), and approaches considering economic feedbacks, especially considering the actual behavior of landowners (Stavins 1999). Moreover, there are no data on sinks under Article 3.4. To avoid arbitrary assumptions that would blur the core of the argument, the estimated tonnages for different proposals were simply subtracted from the Kyoto targets to obtain the new level of abatement to be achieved in the energy sector. For the sake of simplicity we report only on the Umbrella proposal circulated during COP6, with the following tonnages estimated by French forestry experts: 13 MtC for the European Union, 115 for the United States, 4 for Japan, 21 for the EIT.

Under these assumptions, overall costs for the importing zones countries drop to \$37.7 billion on average, a 40% decrease from their \$67.7 billion full-compliance level. To achieve an equivalent (expected value) cost reduction, a restoration payment should be set at \$54/tC.

III.1. Effect on environmental integrity and supplementarity

Comparing the sequestration and RP options depends on three key policy judgments.²⁸ The first regards the integrity of postponed tons, which entirely depends on the credibility of their recovery during further commitment periods. The second regards sequestered tons: critics argue that they correspond to reductions that would have occurred anyway and/or that the underlying activities were not taken into account at Kyoto,²⁹ and that carbon sinks should not be given the same environmental value than non-emitted tons because of the uncertainty about the duration of the sequestration. Others oppose this critique and support the view that the IPCC Land Use, Land Use Change and Forestry special report gives far greater credence to the legitimacy of activities beyond those recognized in Article 3.3 if properly monitored and registered. The third policy judgment flows directly from the argument in favor of the supplementarity condition; it considers action in the energy sector indispensable to the long-term objective of climate control and minimizes sequestration, even if it takes place domestically.

We will not venture to settle these controversies but rather report on basic outcomes, leaving it to the readers to form their own judgments. This is why fig. I.2 distinguishes among (a) domestic (energy sector) abatement, (b) genuine tons imported, (c) hot air tons imported, (d) tons abated during a true-up period through the restoration payments, (e) tons sequestered, and (f) tons postponed to a subsequent compliance period.

²⁸ The minimization of international transfers, correlated to the supplementarity condition, is not retained as a key to the comparison, being found of lesser significance: an overall \$7.7–31.4B likelihood range for the Umbrella option is close enough to the \$9.6–40.8B for the RP to justify an undifferentiated value for the shadow cost of imports.

²⁹ Note that the “hot air” does not induce the same problem: the larger its amount, the higher the emissions from importing countries, but without any effect on total Annex B emissions.

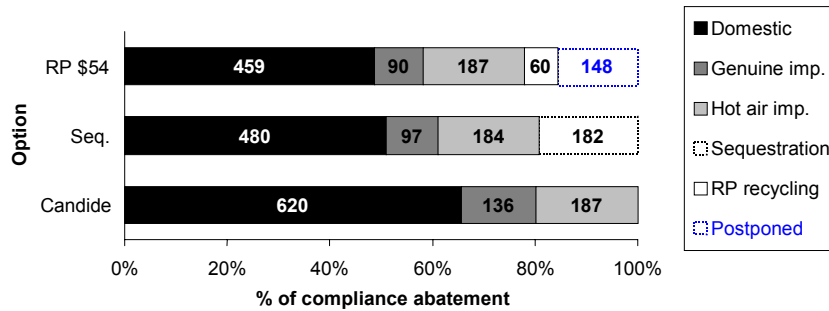


Figure I.2 Split of annual abatement for the importing zones, Candide perspective.

Under Candide conduct, those who prioritize action on the energy sector (categories a, b, and d) give a slight advantage to the restoration payment, which guarantees 64.6% of the target, compared with 61.2% for the sequestration option. However, an equal expected value of expenses in both options masks the fact that under the sequestration option carbon prices can go far beyond the \$54/tC limit set by the RP. This takes us back to the comparison between Candide and non-Candide conduct: under a \$75/tC limit on the WP the Umbrella proposal decreases the domestic and genuine imported tons, inducing 74 MtC of postponed abatement because the sequestration remains at the same level as without WP. Going down to a \$54/tC limit causes a postponement of 123 MtC, and action in energy sectors consecutively drops to 48.1% of Kyoto targets (fig. I.3).

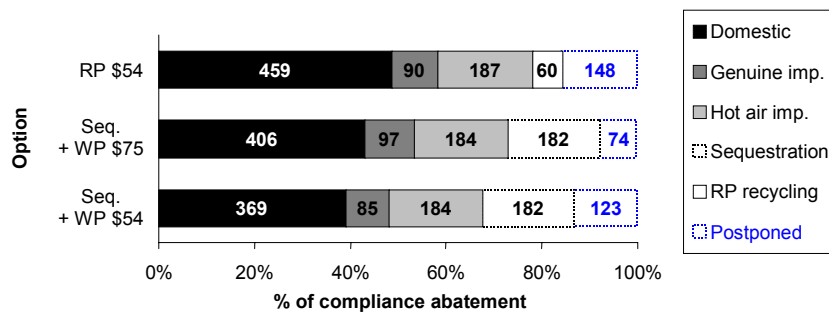


Figure I.3 Split of annual abatement for the importing zones, realistic perspective.

III.2. Effects on costs uncertainty

The very principle of a restoration payment is to set an upper bound to the marginal cost to energy consumers. It is a different economic rationale than that of extended sequestration, which *de facto* amounts to a downward shift of all cost curves. For this reason the insights derived from fig. I.4 are not surprising. But the order of magnitude of the difference between the two options in the likelihood interval of carbon prices is more striking. Fig. I.4 presents the modeling results in a format equivalent to the one used in fig. I.1, for both the competitive (shaded box) and oligopolistic (non-shaded box) markets.

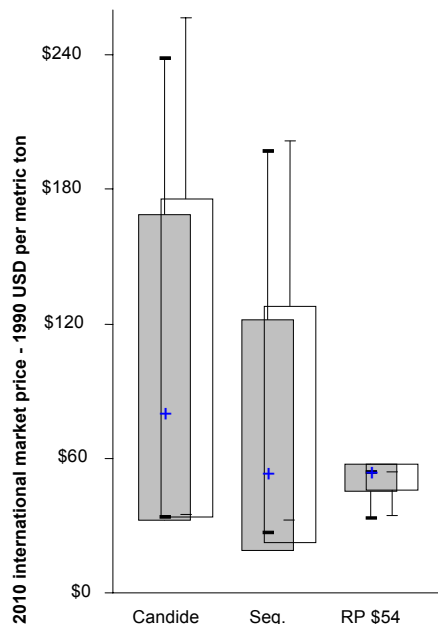


Figure I.4 Sequestration vs. RP
Effect on marginal prices

In both cases the reduction in uncertainty is dramatically higher with an RP than with the sequestration proposal: the likelihood interval's width in the Candide scenario is reduced by 90% under the RP, compared with only 16% in the sequestration option.

We do not plot here the results in terms of total compliance costs, although the differences are of the same order of magnitude: sequestration produces a \$13 billion to \$63 billion likelihood interval, compared with \$31 billion to \$44 billion for the restoration payment.

Note that the lowest bound of carbon prices (and compliance costs) is higher with an RP than with an extended sequestration. This is because the \$54/tC price cap is never reached in the very

optimistic models and thus does not affect the results, whereas tons from sequestration shift the cost curves of every model in the same downward way, whatever their optimism on costs.

The policy implications from these results can be derived in two ways corresponding to the symmetrical and contradictory concerns about compliance costs:

For a reduction of the expected value of compliance costs identical to the one obtained with a \$54/tC restoration payment, extended sequestration is less efficient in allaying the concerns of pessimists about abatement costs. A closer scrutiny of modeling results reveals that the risks that carbon prices may exceed \$120/tC and \$90/tC are still 17% and 25%, regardless of a possible EIT coalition, while the RP guarantees a \$54/tC level by definition.

The difference in the lower bound of the likelihood intervals has a very important implication for minimizing risks of too-low price signals over the first budget period, which is the basic rationale behind the supplementarity condition. A \$19/tC lower bound for carbon price under sequestration aggravates the deficit in supplementarity, compared with a \$45/tC lower bound with a \$54/tC price cap.

IV. Effects on developing countries

COP-6 negotiations had to reconcile two contradictory views: the G77 demanded that developed countries demonstrate their willingness to combat climate change while the United States Senate (Byrd-Hagel resolution, June 12, 1997) demanded that developing countries face "new specific scheduled commitments to limit or reduce greenhouse gas emissions." The Clean Development Mechanism (CDM) was meant to reconcile these views through abatement projects apt "to assist non-Annex I countries in achieving sustainable development" and "to help Annex I countries in achieving compliance with their commitments".

Even though the argument prevails in many quarters of the G77 that technological and financial transfers through this mechanism may not provide development benefits (Estrada 1998)³⁰ it is widely held that the CDM will be the main Kyoto instrument of interest for non Annex B countries.³¹

³⁰ Under certain circumstances, CDM projects can have a leverage effect on development (Mathy *et al.* 2001). The corresponding field of research is marred by the continuing confusion between the CDM and joint implementation.

³¹ One additional proposal in Pronk's text was the extension to all flexibility mechanisms of the Article 12.8 "share of the proceeds" of CDM transactions if Annex B countries did not provide a \$1 billion assistance (reaching this value would require a \$4/tC levy on all mechanisms under a Candide scenario).

The total amount of net transfers accruing to such countries will depend on the magnitude of the surplus generated by projects and on the capacity of the host country to conserve part of it. In the sequestration option, this surplus is \$0.9–2.8B for a \$50 WP and \$1.6–4.4B for a \$100 WP. Under the RP option, the upper bounds for this surplus are increased by factors of approximately 3.5 and 2.8.³² Admittedly, a restoration payment restricts the primary market for CDM projects because of a higher level of domestic action in Annex B, but the reverse auction guarantees that rents accrue to the host country, thereby more than compensating for this contraction.

V. From a lost deal to an incomplete deal

COP6's failure and the US withdrawal at Bonn in July 2001 were partly overcome at COP7 in Marrakech, in November 2001. An accord amongst all UNFCCC parties but the United States was reached thanks to two concessions made by the European Union: the absence of supplementarity condition and higher amounts of sequestration in exchange of a more precise accounting.

It is tempting to assess the environmental cost of The Hague's Lost Deal by comparison with the Marrakech accord. But this would involve hazardous political judgments about whether the United States would have endorsed either the sequestration or the RP deal analyzed in this paper, whether this would have made the rejection of the Protocol more difficult for the new administration, and what the United States abatement outside Kyoto's framework will be. SAP12 simply indicates that its abatement in the energy sector would have been 172–377 MtC under an RP option at \$54/tC and 206–366 MtC under the sequestration option. More informative for the future is to analyze how Marrakech resolves the cost-uncertainty issue.

To do so, we updated key SAP12 data. The previous sections consider the results in Weyant and Hill (1999) as representative of the information available between COP5 and COP6 about compliance costs; but as time passes new information became available, in particular about 2000 emissions and the likely amount of hot air. To remain consistent with the methodology of this paper, which concentrates on possible

³² For the sake of simplicity, the simulated auction is directed to the developing world only. It thus provides an upper estimate of the capacity of the system to attract developing countries. This assumption does not affect in any way the RP results previously reported.

compromises between opposite views, we thus used the latest information available to decision-makers (UNFCCC website and UNFCCC 2001).

Reassessed hot air levels reach a range of 237–516 MtC across various projections, with an average of 376 MtC, more than twice as high as the former 179 MtC average. Reassessed European emissions are 915 MtC,³³ lower than the 1,024–1,170 MtC forecast embodied in the Energy Journal figures. To avoid underestimating compliance costs we chose to consider that the 109–255 MtC reductions between the two baselines "eroded" the low-cost abatement potential appearing on the Energy Journal curves; we thus truncated these curves so that the resulting costs curves show a much steeper slope.

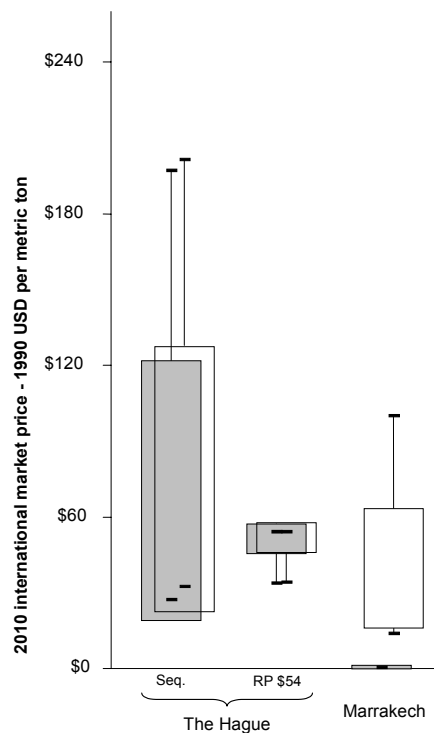


Figure I.5 Effect of Marrakech on marginal prices

The main result shown in fig. I.5 is that the Marrakech accord exacerbates concerns regarding complementarity without fully countering the hard core of the pessimists on the risks of excessive costs. The key uncertainty parameter is political in nature, *i.e.* the oligopolistic capacity of the EIT.

On the one hand, indeed, the conjunction of a lower baseline for the European Union, sequestration allowances totalizing 159 MtC (Locatelli and Loisel 2002) and the absence of U.S. commitments (430–546 MtC) leads to total required reductions substantially lower than the revised hot air estimates: even the 237 MtC hot air lower bound exceeds demand for all twelve models, by 15–58%, when sequestration is taken into account.³⁴ Thus, in a competitive

³³ This figure was obtained by linearly prolonging the observable trends. It is very much compatible with the 340 Mt CO₂-equivalent effort estimated by the European Commission in its latest report on the matter (CEC 2001).

³⁴ The role of sequestration is not negligible: the full range of total abatement requirements (from 225 to 327 MtC) is below the sum of hot air and sequestration (396–675 MtC); it is not below the hot air only (237–516 MtC).

framework the resulting market price would be \$0/tC, resulting in the absence of any domestic action in the importing zones and of any market for CDM projects. A fair comparison with other results requires us to keep in mind that the 109–255 MtC difference between former European baselines and the reassessed ones embodies some extent of domestic action—together with a growth component: altogether the reduction from former baseline amounts to 58–76 % of the former European-required reductions.

On the other hand, the EIT can limit the amount of credits they put on the market so as to maximize their aggregate rent. Contrary to the results in the COP6 context, EIT market power makes quite a significant difference compared with the competitive equilibrium, the absence of a flatter abatement cost curve in the United States lowering the price-elasticity of demand. It turns out that the EIT set their exports at 84–127 MtC, *i.e.* at around half the 174–238 MtC exports on a competitive market, causing prices to rise up to \$15–63/tC. Note that, again, the results are quite insensitive to the assumption about hot air: even the lower bound of hot air suffices to cover all required reductions, and the quantity beyond the total abatement requirements does not matter. Still, it is evident from fig. I.5 that the likelihood interval of marginal costs remains lower than the intervals found in the COP6 context. In terms of total costs, a country such as Japan cuts its expected burden by a factor of 3 compared with the oligopoly case under COP6 conditions (\$1.0–4.7B compared with \$3.0–15.1B).

However, it is remarkable that this cost control is made at the expense of a far higher risk of low prices and low levels of domestic action by comparison with results obtained in the COP6 context: 100% of null prices in a competitive market, and a 50% chance of a price lower than \$35/tC under an oligopolistic market. It also entails far lower net transfers to the developing countries, ranging from a highly probable \$0.0 to \$0.7 billion. Moreover, and perhaps more surprisingly, it still provides a weaker response to the hard core of the pessimists about marginal costs than the \$54/tC RP option in the COP6 conditions: 17% of the estimated carbon prices are above its \$54/tC limit, one model giving \$100/tC.

Conclusion: the narrow pathway to a recovered deal?

The central issue of the post-Kyoto process was that hedging against uncertainty on compliance costs, either in the form of a price cap or through the extension of

sequestration activities, risked creating a loophole in the Kyoto cap-and-trade system. The analysis presented here suggests that the two hedging tools are very different in nature, and that a restoration payment provides a negotiation space large enough to accommodate all the prevailing world views:

As regards environmental integrity, the restoration payment compensates for the absence of financial penalties or formal linkage to the WTO in the compliance system, since good-faith conduct is immediately distinguishable by a government's contribution to the restoration fund. It is, moreover, an efficient complementarity tool because of the risks of extraterritorial payments. And finally, it limits the risks of endlessly postponed abatements in case energy consumers have a limited willingness to pay.

As regards costs control, the restoration payment provides a more efficient hedge against the risks of too-high carbon prices than an equivalent amount of tons under Article 3.4, which symmetrically exacerbates the risk of too-low prices.

A restoration payment provides a significant source of transfers to the developing countries in the spirit of the Brazilian 1997 proposal, whereas extending sequestration activities under Article 3.4 undermines the prospects for significant CDM and share-of-the-proceeds revenues.

Ultimately, the restoration payment option, instead of *ex ante* revising Kyoto targets, would have given Kyoto targets a chance until an *ex post* assessment in 2012: it more than triples its 8% probability under a \$50 willingness to pay, and can even raise it to 50% if one gives greater credence to the more optimistic models. In contrast, the Marrakech accord provides less efficient cost-control while increasing the chance of excessively low carbon prices and the corresponding risk of not triggering any domestic action in the participating countries.

The hope of economic analysis is to inject some objectivity into policy discussions. To pursue this aim in climate change affairs is a daunting task because parties with opposing expectations and visions of fairness are likely to view all models as controversial. The lesson from our exercise is that it is essential to incorporate uncertainty into the framework of international coordination, rather than engage in infinite controversies that delay action and could make ambitious targets unreachable.

Beyond the Kyoto targets and timetables, it appears that a hybrid quantity-price instrument is a robust approach to cope with uncertainties, hence facilitating the negotiation of further budget periods and the appeal of active climate policies to

developing countries. The usefulness of such an economic message depends on two conditions: first, that every party acts in a manner consistent with its stated world view and is not motivated by a hidden agenda; and second, that diplomats, policymakers, and environmentalists remember an old Roman saying, *audi alteram partem*: listen to the other side.

Chapitre II

**Double dividende des
politiques climatiques :**

**une controverse
macroéconomique**

Introduction : propos d'étape

Notre premier chapitre, ayant mis en lumière et quantifié l'incertitude caractérisant l'évaluation des politiques climatiques, y a répondu en proposant des mécanismes d'encadrement du marché à même de la circonscrire. De toute évidence, la nature politique d'une telle solution laisse en suspens un certain nombre de questions, et notamment, de manière assez flagrante, celle des déterminants des divergences observées dans les expertises fournies par les différents modèles. Par nature, SAP12 masque ces déterminants en utilisant des formes réduites des résultats des modèles qu'il synthétise. Pour les révéler, il faut en fait commencer par distinguer deux champs de prospective : en amont, prospective énergétique, soit réactivité de l'offre et de la demande d'énergie en équilibre partiel; en aval, prospective macroéconomique, soit effets en retour des mécanismes d'équilibre général sur les réactivités mises à jour par la prospective énergétique. Dans l'évaluation de politiques climatiques, l'un comme l'autre de ces champs de prospective ont été le lieu de controverses appuyées, au cœur des problématiques abordées par cette thèse.

Le propos de ce second chapitre est ainsi de présenter les controverses entourant les effets macroéconomiques d'une contrainte carbone, controverses qui se sont cristallisées au cours des années 1990 sur la question du double dividende. Nous commençons par préciser le cadre d'analyse général dans lequel la réflexion sur le double dividende a historiquement été menée, en présentant un jeu de conclusions théoriques désormais consensuelles. Dans un deuxième temps nous développons le principal argumentaire contrant l'intuition initiale du second dividende, en le tempérant d'un ensemble de considérations tirées des travaux de ses auteurs eux-mêmes. Enfin, nous proposons un ensemble de résultats analytiques obtenus d'un modèle simple, qui viennent étayer l'ambiguïté de l'obtention du second dividende, et en dernière analyse justifier la poursuite d'entreprises de modélisation numérique telles que celle faisant l'objet de nos travaux.

I. Éléments de consensus théorique

Les premiers modèles empiriques développés autour de ces questions, souvent néo-keynésiens, confirment l'intuition d'un bilan macroéconomique positif d'écotaxes dont

les revenus seraient utilisés pour diminuer les prélèvements sur le travail en Europe (DG II 1992, Barker *et al.* 1993, Godard, Beaumais 1994), et sur le capital aux États-Unis (Shackleton 1992)³⁵. Une critique théorique de ces résultats est alors menée, à partir d'approches en termes d'équilibre général, pour mettre en garde contre la tentation de survendre les écotaxes et contre l'illusion de politiques climatiques à coût nul quels que soient les objectifs de réductions d'émissions.

Toutefois ces oppositions débouchent sur un consensus que l'on peut résumer à partir de la figure II.1 (GIEC 1996) :

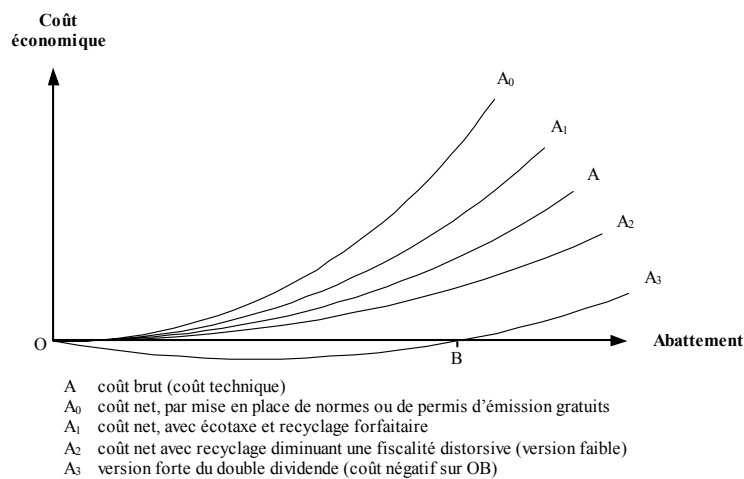


Figure II.1 Coûts des politiques climatiques

La courbe *A* représente les coûts marginaux des techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre à une date donnée. L'adoption de ces techniques sous la pression de normes et réglementations, ou d'un système de permis d'émission négociables attribués gratuitement, entraîne des coûts macro-économiques nets (courbe *A₀*) supérieurs aux coûts techniques, en raison de transformations dans les prix relatifs, et de l'appropriation d'une rente de rareté dans les secteurs dont la demande est peu élastique aux prix (Fullerton, Metcalf 1998). Une écotaxe (ou des permis d'émission négociables attribués aux enchères) permet une réaffectation de ces rentes qui diminue le coût net des politiques; lorsque les modèles recyclent les revenus de cette taxe de façon forfaitaire, l'écart se réduit entre coûts techniques et coûts nets (courbe *A₁*); mais

³⁵ Pour un bilan comparatif de cette première génération d'études, se reporter au deuxième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC 1996).

il est toujours possible d'améliorer ce résultat en substituant au recyclage forfaitaire une diminution des prélèvements les plus distorsifs pour l'économie (courbes A_2 et A_3).

Il y a donc accord sur l'existence d'un deuxième dividende des écotaxes (différence entre le coût macro-économique des politiques environnementales avec et sans taxe). La controverse porte sur le fait de savoir si un recyclage optimal permet d'obtenir un gain par rapport au coût technique brut, mais pour un bilan macroéconomique restant négatif (courbe A_2), ou bien s'il débouche sur un bilan macroéconomique positif pour certains montants de réductions (courbe A_3 , segment OB)³⁶.

Toute la difficulté d'un règlement de cette controverse réside dans le fait que les conditions nécessaires d'obtention d'un second dividende « fort » entremêlent des paramètres eux-mêmes fort disputés, de deux natures distinctes :

- d'une part, les effets incitatifs du signal prix mis en place : une taxe carbone a pour objectif de modifier les comportements de consommation et les choix techniques ;
- d'autre part, des mécanismes purement macroéconomiques : l'effet distorsif relatif de la taxe carbone par rapport à celui de la taxe à laquelle elle se substitue, l'impact sur le niveau relatif des prix donc la consommation, la balance commerciale, et en dernière analyse le niveau général d'activité et l'emploi.

La suite de ce chapitre se concentre sur l'étude du second de ces derniers paramètres, en proposant tout d'abord une discussion puis un modèle analytique simple permettant d'en mesurer la portée. Le premier paramètre, qui fait l'objet principal du chapitre III, ne sera qu'évoqué par les conséquences de l'érosion de la base fiscale nouvellement créée qu'il implique.

³⁶ À l'instar de Goulder (1995), nous qualifierons ces deux versions du double dividende de « faible » et « forte ». La version forte est celle que recouvre l'utilisation du terme « double dividende » dans le débat public (il en sera de même dans la suite de ce document).

II. Quelle ampleur pour le second dividende ?

La possibilité qu'une fiscalité environnementale puisse, par le recyclage de son produit, conduire à un bénéfice net en termes de bien-être est introduite dès les années 1960 par Tullock—qui en un raccourci évocateur titre *Excess benefit*—, puis popularisée dans les années 1980 (Terkla 1984; Lee, Misiolek 1986; Baumol, Oates 1988) et au début des années 1990 (Pearce 1991, Poterba 1991) dans le sillage de l'émergence de grands dossiers environnementaux. Sous l'hypothèse du recyclage du produit d'une écotaxe par baisse des cotisations sociales sur le travail, construction la plus étudiée en Europe du fait de la prépondérance des questions de chômage, l'intuition du double dividende est celle d'un cercle vertueux qui par une baisse des coûts salariaux entraîne une hausse de l'emploi, de la consommation des ménages et de l'activité.

Les années 1990 voient la contestation d'une telle intuition dans une série d'articles initiée par Lans Bovenberg, en collaboration avec De Mooij (1994a, 1994b) ou van der Ploeg (1994a, 1994b). Ces articles sont fondés sur le développement de variations analytiques d'un modèle simple caractérisé par un agent unique, dont la dotation en temps est partagée entre loisir, production de bien « sale » (polluant) et production de bien « propre » (non polluant) à taux de transformation constant et normé à 1; le travail (somme des deux productions) ainsi que la consommation de bien sale sont taxés, et les revenus de ces taxations sont reversés à l'agent. Dans un tel cadre, une hausse du prélèvement sur le bien sale compensée par une baisse de celui sur le travail provoque une perte d'utilité³⁷. Goulder (1995) synthétise le mécanisme général expliquant ce résultat en proposant le raisonnement suivant :

- la taxation du bien sale retombe en dernière analyse sur l'unique facteur de production, le travail, puisqu'elle constitue une perte de pouvoir d'achat; à pression fiscale constante, la distorsion nouvellement induite sur le marché du travail est au moins équivalente (taxer l'ensemble des biens de consommation le serait strictement) à celle à laquelle elle se substitue;

³⁷ Le recours à une fonction de bien-être social n'est pas anodin : il s'accompagne d'un rejet des qualifications du double dividende en termes d'emploi ou de croissance, telles que pratiquées par les analyses numériques corroborant les intuitions optimistes contestées.

- elle crée en outre—c'est précisément sa justification—une distorsion nouvelle sur le marché des biens de consommation, puisqu'elle se fait au détriment de la consommation de bien sale et à l'avantage de celle de bien propre, alors que le prélèvement sur le travail initial ne discrimine pas l'un ou l'autre bien;

L'agent subit donc deux distorsions nouvelles, dont une au moins équivalente à la seule qui l'affectait *ex ante* : le coût de la réforme en bien-être est nécessairement strictement positif. Incidemment, la baisse de l'utilité du revenu marginal modifie l'arbitrage entre travail et loisir en faveur de ce dernier—ce que l'on peut interpréter comme une baisse de l'activité et un coût net en emploi.

Le cadre épuré dans lequel l'analyse est menée prête de toute évidence au questionnement des résultats obtenus. Goulder dès son texte de 1995 propose une série d'intuitions prolongeant les résultats démontrés. Quatre ans plus tard, faisant le point sur l'avancée des débats, Bovenberg (1999) complète et étoffe cet aperçu dans un article qui fait écho à celui de Goulder. Il ressort de ces travaux que la portée de l'analyse initiale est principalement limitée par trois types de facteurs :

- l'inefficacité *ex ante* de la fiscalité en place : la prise en compte d'un facteur de production supplémentaire, taxé selon une charge marginale excédentaire contrastée, peut renverser le sens de la variation de bien-être. Notamment, si la taxation environnementale, du fait des structures de production, retombe en priorité sur un facteur capital³⁸ relativement peu taxé par rapport au travail, un gain net est possible;
- la transmission de la charge fiscale : l'argumentation contrant l'intuition d'un second dividende sous-entend notamment que la substitution entre écotaxes et prélèvements sur le travail ou les profits est neutre, *coeteris paribus*, pour la formation des coûts de production. Or, dans la mesure où elle touche aussi les ménages, une écotaxe se comporte comme une taxe implicite sur les revenus non salariaux (dont les revenus de transfert), et permet ainsi un allègement net de la charge fiscale pesant sur la production (Koskela, Schöb 1999). Dans le même ordre d'idée, elle peut dans une certaine mesure constituer une taxation implicite des rentes des producteurs d'énergie fossile, au sein d'une économie

³⁸ Hypothèse plausible dans le cas d'une taxe carbone, la production d'énergie étant particulièrement plus intensive en capital qu'en travail. C'est un des mécanismes que l'on exploite dans le modèle analytique simple ci-dessous.

(Koskela, Schöb 1999; Renström, Marsiliani 1997) ou au-delà de ses frontières au bénéfice de sa balance commerciale (Yu, 2001).

- les imperfections *ex-ante* du marché du travail : dans l'hypothèse—réaliste pour beaucoup d'économies—d'une rigidité à la baisse des salaires nominaux, Carraro et Soubeyran (1996) ou Bovenberg et van der Ploeg (1996) montrent que l'effet sur la création d'emplois de la diminution des prélèvements sur le travail est magnifié, et l'impact de la hausse d'emploi sur le revenu disponible brut susceptible de transformer la perte nette de bien-être en un gain.

On peut compléter ce dernier point sur le marché du travail de deux considérations :

- supposer une flexibilité absolue des salaires et faire l'hypothèse que les salariés arbitrent en faveur du loisir en cas de baisse de leur pouvoir d'achat, c'est ignorer le recours à l'économie domestique ou à l'économie parallèle. Introduire un secteur informel dans l'analyse inverse les résultats surtout si l'on tient compte de la baisse de la propension à la fraude.
- Cremer et Gahvari (1995) démontrent que, lorsque les biens achetés par les ménages sont hétérogènes quant à leur rigidité, la prise en compte de l'incertitude sur le revenu futur modifie très sensiblement les conclusions d'Atkinson et Stiglitz (1976) sur la taxation optimale. Ce raisonnement peut être transposé au comportement de l'entrepreneur : certes les écotaxes retombent *in fine*, partiellement du moins, sur les coûts de production; toutefois, emploi et consommation d'énergie sont deux facteurs aux capacités d'ajustement opposées. L'emploi, pour des motifs légaux, sociaux, techniques et organisationnels, est marqué par une forte rigidité, au point que tout prélèvement sur le travail constitue un impôt implicite sur les sureffectifs en cycle baissier. La consommation d'énergie, en revanche, est naturellement corrélée au cycle des affaires. En contexte d'incertitude sur l'évolution de ce dernier, le remplacement du travail par l'énergie comme base fiscale ne peut être neutre par rapport à la propension à embaucher pour une espérance mathématique donnée sur les ventes de la firme (Hélioui 1997).

Bovenberg définit ainsi lui-même une multiplicité de directions dans lesquelles étoffer son cadre d'analyse originel³⁹ afin de favoriser l'obtention d'un second dividende. En

³⁹ Nous n'avons pas mentionné les plus difficilement quantifiables d'entre elles, ni celles franchissant trop évidemment la frontière entre premier et second dividende (ainsi de la substituabilité entre qualité de l'environnement et loisir, de la prise en compte de cette qualité de l'environnement dans la fonction de production, *etc.*)

parallèle à l'ensemble de ces raffinements, et de manière plus fondamentale, on peut questionner l'absence de représentation d'un système explicite de prix dans le modèle de base : en fonction des intensités en énergie et en travail du bien propre, le sens ultime de la variation de son prix n'est pas donné, or l'hypothèse d'une déflation de ce prix ne serait-elle pas à même de modifier l'effet ultime sur le bien-être et l'activité ? Le reste de ce chapitre est dédié à l'étude de cet effet prix dans un cadre d'analyse simple où la formation des coûts de production est traitée de manière descriptive, sans hypothèse restrictive sur la forme des fonctions de production sous-jacente, pour déboucher sur des conclusions d'ordre général.

III. Structure de production et effet prix : analyse d'un modèle simple

Soit une économie autarcique à deux secteurs de production, un secteur de l'énergie E et un secteur composite Q , caractérisé par un tableau entrées-sorties (TES) simplifié

CI					CF	'Emplois'
			Q	E	T	
	Q		$p_Q \alpha_{QQ} Q$	$p_Q \alpha_{QE} E$	Σ	$p_Q Q_f$
	E		$p_E \alpha_{EQ} Q$ $+ t \alpha_{EQ} Q$	$p_E \alpha_{EE} E$ $+ t \alpha_{EE} E$	Σ	$p_E E_f$ $+ t E_f$
	T		Σ	Σ	$\Sigma (= CI)$	Σ
VA	RB		$w_Q (1+\sigma) l_Q Q$	-	Σ	
	Π		$p_Q \pi Q$	$p_E \pi E$	Σ	
	T		Σ	Σ	$\Sigma (= PIB)$	
Taxe			-	$t E$	Σ	
'Ressources'			$p_Q Q$	$p_E E$ $+ t E$	Σ	

Tableau II.1 Mise en équation d'un TES simple

Ce TES est défini par les valeurs de quinze variables, soit

- p_X le prix du bien X (E ou Q),
- α_{XY} la consommation physique de bien X dans la production d'un bien Y (les coefficients α_{XY} forment la matrice de Leontief),
- X la production nationale réelle de bien X (Q ou E),
- X_f la consommation finale réelle de bien X , tous agents et usages confondus,

- w_Q le salaire unitaire dans le secteur Q ,
- l_Q la consommation unitaire de travail dans le secteur Q (le secteur E n'en consomme pas pour simplification),
- σ le taux de prélèvement sur le salaire unitaire, *ad valorem*.
- π le taux de profit, commun aux deux secteurs pour simplification,
- t une taxe prélevée sur les émissions de carbone, donc liée aux consommations d'énergie réelles intermédiaires et finales.

Supprimons immédiatement la dimension de la production de bien composite Q , en divisant l'ensemble du tableau par Q , et en posant $e \equiv \frac{E}{Q}$, $q_f \equiv \frac{Q_f}{Q}$, $e_f \equiv \frac{E_f}{E}$ pour obtenir un nouveau tableau

CI			T	CF	'Emplois'
	Q	E			
Q	$p_Q \alpha_{QQ}$	$p_Q \alpha_{QE} e$	Σ	$p_Q q_f$	p_Q
E	$p_E \alpha_{EQ} + t \alpha_{EQ}$	$p_E \alpha_{EE} e + t \alpha_{EE} e$	Σ	$p_E e_f e + t e_f e$	$p_E e + t e$
T	Σ	Σ	$\Sigma (= CI)$	Σ	Σ
VA	RB	$w_Q (1+\sigma) l_Q$	Σ		
	Π	$p_Q \pi$	Σ		
	T	Σ	$\Sigma (= PIB)$		
Taxe	—	$t e$	Σ		
'Ressources'	p_Q	$p_E e + t e$	Σ		

Tableau II.2 TES « unitaire »

La lecture horizontale et verticale de chacun des deux secteurs permet, avec des simplifications triviales—on suppose que l'ensemble des variables sont strictement positives, de définir quatre équations,

$$p_Q = p_Q \alpha_{QQ} + (p_E + t) \alpha_{EQ} + w_Q (1+\sigma) l_Q + p_Q \pi \quad (II.1)$$

$$p_E = p_Q \alpha_{QE} + (p_E + t) \alpha_{EE} + p_E \pi \quad (II.2)$$

$$\alpha_{QQ} + \alpha_{QE} e + q_f = 1 \quad (II.3)$$

$$\alpha_{EQ} + \alpha_{EE} e + e_f e = e \quad (II.4)$$

où l'on retrouve pour chaque production un équilibre emplois-ressources nominal et réel, soit : deux équations de formations des prix, qui sont égaux à la somme des consommations intermédiaires (CI) et de la valeur ajoutée (VA), elle-même constituée

des rémunérations brutes (RB) et du profit (Π); deux équations d'équilibre des quantités, soit d'égalité entre le volume produit et les volumes de consommation intermédiaires et finaux.

Ces quatre équations sont en fait—outre celle de stricte positivité—les seules contraintes qui pèsent sur le choix de quinze valeurs pour les quinze variables qui définissent le TES⁴⁰. Autrement dit, l'ensemble des 15-uplets d'éléments strictement positifs qui respectent ces quatre équations décrit l'ensemble des économies possibles, même si de toute évidence certains éléments de cet ensemble sont plus plausibles que d'autres—selon par exemple les rapports entre CI et VA, ou entre salaires nets et transferts, qu'ils supposent.

L'étude de la transmission de l'effet-prix d'une hausse de taxe carbone peut donc être menée à partir du système ci-dessus uniquement. Elle suppose au premier ordre de considérer les variations de p_E et p_Q (variables d'état, selon la terminologie de la statique comparative) en fonction de celles de t (variable de contrôle), l'ensemble des autres notations définissant notre économie étant considérées comme des paramètres, que l'on pose strictement positifs.

III.1. Taxe recyclée dans un transfert forfaitaire

L'impact d'une hausse dt de t sur p_Q dans le cas d'un recyclage forfaitaire est déterminé par la résolution en p_E et p_Q du système formé par les équations (II.1) et (II.2) : d'une part l'équilibre du système suppose bien que les produits de t et σ financent la consommation finale (cf. note de bas de page précédente); d'autre part ni p_Q , ni p_E , ni t n'apparaissent dans les équations (II.3) et (II.4)⁴¹. On obtient aisément

$$p_Q = \frac{1}{1 - \alpha_{QQ} - \pi - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}} \left(\left(\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} \right) t + w_Q (1 + \sigma) l_Q \right) \quad (\text{II.5})$$

⁴⁰ Notamment : la contrainte budgétaire pesant sur la production finale peut être obtenue en injectant dans (II.1) les expressions de α_{QQ} et α_{EQ} tirées des équations (II.3) et (II.4), puis dans l'équation résultante celle de $(p_E + t) \alpha_{EE}$ tirée de (II.2).

⁴¹ On a donc bien exactement autant d'équations que de variables d'état, condition nécessaire à notre exercice de statique comparative puisque le système en p_E , p_Q et t est linéaire.

soit la dérivée de p_Q par rapport à t

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}}{1 - \alpha_{QQ} - \pi - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}} \quad (\text{II.6})$$

L'équation (II.5) nous indique que pour que p_Q soit positif le dénominateur de cette dérivée doit l'être aussi⁴²; on peut donc conclure qu'à matrice de Leontief fixée une hausse de la taxe carbone recyclée de manière forfaitaire conduit à une hausse du prix du bien composite. Le numérateur permet incidemment de distinguer dans les termes de sa somme un effet direct dû à la hausse du prélèvement t sur la base α_{EQ} , et un effet indirect dû au bouclage avec la hausse de p_E .

III.2. Taxe recyclée dans une baisse des charges sur le travail

Le recyclage de la taxe dans une baisse de la fiscalité préexistante modifie ce résultat, non seulement quantitativement mais aussi qualitativement. Dans notre économie simplifiée la fiscalité préexistante se résume à σ , le taux de charges sur le travail; on étend donc le système précédent en conférant à σ le statut de variable d'état, pour étudier les variations de p_E , p_Q et σ en fonction de celle de t , les autres notations du système conservant leur statut de paramètre. La constance des prélèvements fournit l'équation supplémentaire nécessaire à l'analyse—et suffisante dans la mesure où elle est linéaire en p_Q , p_E et σ . On peut interpréter cette constance, ou « neutralité budgétaire », de différentes manières, et notamment considérer une constance absolue des prélèvements par unité de bien composite produite n , que l'on peut écrire

$$\sigma w_Q l_Q + t e = n, \quad (\text{II.7})$$

ou alors une neutralité budgétaire relative, qui lie le niveau des prélèvements à celui de la production distribuée,

$$\sigma w_Q l_Q + t e = n p_Q. \quad (\text{II.8})$$

⁴² On démontre que $1 - \alpha_{EE} - \pi$ est strictement positif par résolution de l'équation (II.2) en p_E , et considérant que l'ensemble des quinze variables et paramètres sont supposés strictement positifs. De même, $1 - \alpha_{QQ} - \pi > 0$.

III.2.1. À prélèvements fixes

Supposons pour commencer, ainsi que l'on fait historiquement Bovenberg *et al.*, une constance absolue du niveau de prélèvements. En tirant $\sigma w_Q l_Q$ de l'équations (II.7) et en l'injectant dans les équations de prix (II.1) et (II.2) on obtient un nouveau système linéaire en p_Q et p_E , que l'on résout pour obtenir

$$p_Q = \frac{1}{1 - \alpha_{QQ} - \pi - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}} \left(\left(\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} - e \right) t + w_Q l_Q + n \right) \quad (\text{II.9})$$

et donc

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} - e}{1 - \alpha_{QQ} - \pi - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}} \quad (\text{II.10})$$

Comme précédemment, la solution de p_Q permet de déduire que le dénominateur de la dérivée est positif, l'autre facteur constitutif de p_Q l'étant assurément puisque n est supérieur à $t e$ —par l'équation (II.7) et la positivité des paramètres. On en déduit que le signe de la dérivée ne dépend que de celui de son numérateur, où l'on retrouve :

- un terme positif, composé des mêmes effets inflationnistes direct et indirect qu'à l'équation (II.6), lié à l'intensité énergétique globale de l'appareil productif;
- un terme négatif, correspondant à l'effet déflationniste dû au recyclage de la taxe, et dont l'ampleur dépend de la magnitude de e la nouvelle base fiscale.

En remplaçant e par son expression tirée de l'équation (II.4), la condition de positivité du numérateur devient

$$\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EQ} \alpha_{EE}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} - \frac{\alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - e_f} > 0, \quad (\text{II.11})$$

ce qui après simplification est équivalent à

$$\frac{\alpha_{EE}}{e_f} > \frac{1 - \pi}{\pi}. \quad (\text{II.12})$$

En multipliant cette inégalité par $p_E E$ et en injectant la définition de e_f on obtient

$$\frac{p_E \alpha_{EE} E}{p_E E_f} > \frac{p_E E - p_E \pi E}{p_E \pi E}, \quad (\text{II.13})$$

dont on peut empiriquement tester la validité pour toute économie pour laquelle on dispose de statistiques :

- $p_E \alpha_{EE} E$ le montant des dépenses intermédiaires d'énergies dans la production d'énergie,
- $p_E E_f$ le montant de dépenses énergétiques finales (des ménages),
- $p_E \pi E$ le montant de valeur ajoutée dans la production d'énergie.

En réalité, $\frac{p_E \pi E}{p_E E}$ la part de la valeur ajoutée dans la formation des coûts de production ne dépasse pas 25% pour la très grande majorité des économies, et le terme de droite de l'inégalité est donc nécessairement supérieur à 3. Le terme de gauche, quant à lui, représente le ratio entre la masse nominale des consommations d'énergie dans la production d'énergie et celle des consommations finales d'énergie; même dans le cas où l'on restreindrait la définition de E aux énergies fossiles, et en considérant des pays dont la production d'électricité est entièrement fondée sur la combustion de telles énergies, le poids des consommations à usage de chauffage domestique et/ou de transport particulier interdit à ce ratio d'atteindre une telle valeur. On peut donc conclure que dans le cas d'un recyclage à volume de prélèvements constants l'effet de premier ordre de la taxe est déflationniste.

III.2.2. À prélèvements proportionnels

Étudions maintenant le cas où les prélèvements sont maintenus constants relativement au prix du bien composite (à la production distribuée de bien composite). En résolvant en p_Q , p_E et σ le système formé par les équations (II.1), (II.2) et (II.8) on obtient

$$p_Q = \frac{1}{1 - \alpha_{QQ} - \pi - n - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}} \left(\left(\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} - e \right) t + w_Q l_Q \right) \quad (\text{II.14})$$

soit

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{\alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} - e}{1 - \alpha_{QQ} - \pi - n - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}} \quad (\text{II.15})$$

On retrouve donc une expression semblable à (II.10), mais l'apparition de n au dénominateur complexifie l'analyse de son signe. À consommations intermédiaires d'énergie et taux de profit fixés, d'un point de vue purement mathématique le signe de

la dérivée dépend des valeurs de n et de e . Pour e et n positifs on peut diviser l'espace des couples possibles en quatre cadrans délimités par des valeurs seuils

$e^* \equiv \alpha_{EQ} + \frac{\alpha_{EE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}$ et $n^* \equiv 1 - \alpha_{QQ} - \pi - \frac{\alpha_{QE} \alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - \pi}$ annulant respectivement le numérateur et le dénominateur de la dérivée :

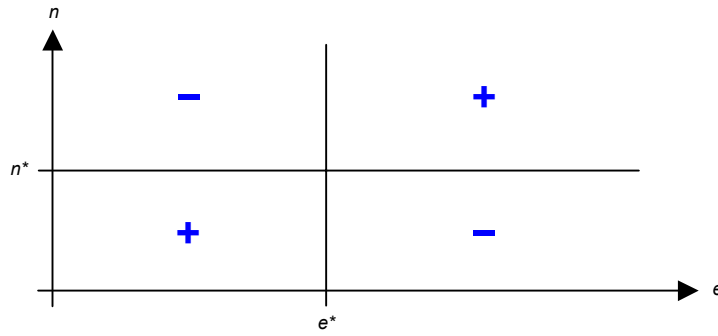


Figure III.2 Signe de $\frac{dp_Q}{dt}$ dans le plan (e, n)

Cependant, la stricte positivité de l'ensemble des paramètres, et la contrainte de positivité des variables d'état p_Q , p_E et σ de notre système permettent de limiter cet espace.

L'équation (II.1) permet ainsi de poser

$$p_Q > t \alpha_{EQ} + w_Q l_Q \quad (\text{II.16})$$

soit en composant avec la définition de p_Q en (II.14), où l'on injecte les définitions de n^* et e^* ,

$$\frac{1}{n^* - n} \left((e^* - e) t + w_Q l_Q \right) > t \alpha_{EQ} + w_Q l_Q \quad (\text{II.17})$$

La condition dépend donc du signe de $n^* - n$, soit

$$n < n^* \Rightarrow n > n^* + \frac{1}{\alpha_{EQ} + \frac{w_Q l_Q}{t}} \left(e - \left(e^* + \frac{w_Q l_Q}{t} \right) \right) \quad (\text{II.18})$$

et

$$n > n^* \Rightarrow n < n^* + \frac{1}{\alpha_{EQ} + \frac{w_Q l_Q}{t}} \left(e - \left(e^* + \frac{w_Q l_Q}{t} \right) \right) \quad (\text{II.19})$$

On peut représenter cette contrainte en traçant dans la figure III.2 n fonction affine de

$$e \text{ suivant } n = \frac{1}{\alpha_{EQ} + \frac{w_Q l_Q}{t}} e + \left(n^* - \frac{e^* + \frac{w_Q l_Q}{t}}{\alpha_{EQ} + \frac{w_Q l_Q}{t}} \right). \text{ L'injection des définitions de } e^* \text{ et } n^* \text{ dans le terme entre parenthèses permet de déterminer qu'il est négatif. On peut donc réviser la représentation graphique du problème de la fig. III.2 en excluant certaines zones (hachurées ci-dessous) :}$$

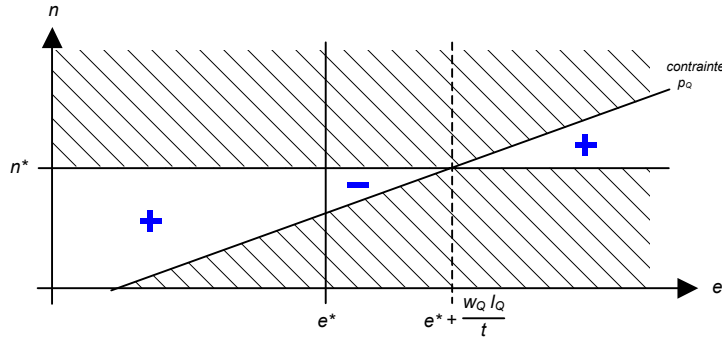


Figure III.3 Bornage des économies dans le plan (e, n) par contrainte sur p_Q

De la même manière l'équation (II.2) et la stricte positivité des variables et paramètres permettent de poser

$$p_E > t \alpha_{EE} \quad (II.20)$$

soit en remplaçant p_E par son expression tirée de (II.2), et en intégrant l'expression de p_Q de l'équation (II.14),

$$\frac{1}{1 - \alpha_{EE} - \pi} \left(\frac{(e^* - e) t + w_Q l_Q}{n^* - n} \alpha_{QE} + t \alpha_{EE} \right) > t \alpha_{EE} \quad (II.21)$$

et on obtient donc, à nouveau en fonction du signe de $n^* - n$,

$$n < n^* \Rightarrow n < n^* - \frac{\alpha_{QE}}{\alpha_{EE} (\alpha_{EE} + \pi)} \left(e - \left(e^* + \frac{w_Q l_Q}{t} \right) \right) \quad (II.22)$$

et

$$n > n^* \Rightarrow n > n^* - \frac{\alpha_{QE}}{\alpha_{EE} (\alpha_{EE} + \pi)} \left(e - \left(e^* + \frac{w_Q l_Q}{t} \right) \right) \quad (II.23)$$

Enfin,

$$\sigma > 0 \quad (II.24)$$

donne, multiplié par $w_Q l_Q$, et remplacé selon l'équation (II.8) en exprimant p_Q

$$\frac{n}{n^* - n} ((e^* - e)t + w_Q l_Q) - te > 0 \quad (II.25)$$

soit

$$n < n^* \Rightarrow n > \frac{n^*}{e^* + \frac{w_Q l_Q}{t}} e \quad (II.26)$$

soit

$$n > n^* \Rightarrow n < \frac{n^*}{e^* + \frac{w_Q l_Q}{t}} e \quad (II.27)$$

On obtient donc deux nouvelles bornes de notre ensemble de définition, matérialisées

par les fonctions $n = \frac{-\alpha_{QE}}{\alpha_{EE}(\alpha_{EE} + \pi)} e + \left(n^* + \frac{\alpha_{QE} \left(e^* + \frac{w_Q l_Q}{t} \right)}{\alpha_{EE}(\alpha_{EE} + \pi)} \right)$ et $n = \frac{n^*}{e^* + \frac{w_Q l_Q}{t}} e$.

En leur ajoutant la contrainte empirique $e > e^*$ on aboutit à une forte limitation des couples (e, n) plausibles, soit graphiquement :

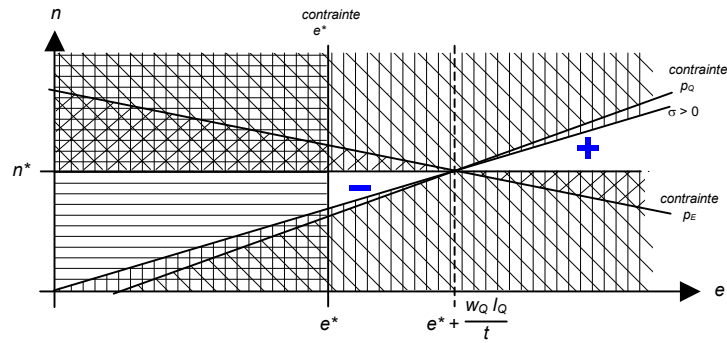


Figure III.4 Borne des économies possibles dans le plan (e, n) par contrainte sur p_Q et p_E et positivité de σ ⁴³

⁴³ On peut aussi remarquer que le signe de la dérivée selon les valeurs de n et de e est univoque, du fait de la corrélation des deux paramètres L'interprétation économique de ce résultat est très

Les contraintes (II.14), (II.18) et (II.22) sur les trois variables d'état ne permettent donc pas d'écarter la possibilité d'une dérivée négative, soit d'un effet déflationniste de la réforme⁴⁴. On vérifie en effet que l'on peut, par tâtonnement, construire deux économies plausibles affichant l'un et l'autre signe de dérivée.

Considérons donc une économie dont l'intensité énergétique e et le taux de prélèvement n la situent dans le cadran où la dérivée de p_Q est négative. Dans l'hypothèse d'une augmentation de la taxe t , on voit que la droite matérialisant la contrainte $\sigma > 0$ va se redresser jusqu'à venir buter sur le point (e, n) où se situe cette économie : on peut augmenter t au point d'annuler σ et conserver une dérivée négative à p_Q pour tout niveau de t ; dans un tel cadre la réforme fiscale envisagée paraît unanimement déflationniste, avec pour limite le niveau de prix atteint par l'annulation de σ .

Considérons à l'inverse une économie que ses niveaux d'intensité énergétique et de prélèvements situent dans le cadran où la dérivée de p_Q est positive. Dans ce cadran, une augmentation de t a graphiquement le même effet de redresser la droite de contrainte $\sigma > 0$, mais cette fois-ci, quel que soit le point (e, n) choisi, la droite de contrainte s'en éloigne au fur et à mesure de l'augmentation de t ; le niveau de t semble donc n'être contraint d'aucune manière, contrairement au cas où la dérivée est négative. L'explication de cette constatation réside dans la variation de σ : l'équation (II.8) nous permet d'exprimer sa dérivée par t en fonction de celle de p_Q , et on s'aperçoit en injectant dans l'équation obtenue la définition de la dérivée de p_Q que la dérivée de σ est nécessairement positive dès lors que cette dérivée l'est aussi. Dans le cas inflationniste, il apparaît donc que la hausse par t de $t e$ est nécessairement inférieure à celle de $n p_Q$ causée par p_Q , lui-même croissant du fait de t : le bouclage de l'effet

intuitif : le bornage de la figure III.4 suggère une mesure de corrélation entre e et n , que l'on peut comprendre aisément avec l'équation II.8. On peut y deviner l'influence négative sur le niveau des prix d'un fort taux de taxation t *ex ante* (corrélé à n grand et e grand).

⁴⁴ (II.14) et (II.18) ne sont en effet que des *bornes* inférieures que l'on peut déterminer aux prix p_Q et p_E , au sens mathématique où elles ne peuvent être atteintes—elles sont en effet obtenues en annulant p_Q et p_E dans les équations de prix (II.1) et (II.2). On peut composer les deux contraintes en réinjectant les p_Q et p_E minimums dans leurs équations, mais ceci revient, à l'infini, à converger vers les valeurs d'équilibre, soit le vecteur unique (p_Q, p_E) vérifiant les équations (II.1) et (II.2) point de départ de la réinjection, et les contraintes se résolvent alors en tautologies. Sur ce constat, on a cherché à composer les deux contraintes à des ordres finis, mais ne serait-ce qu'à l'ordre 1 on obtient pour p_Q

$$p_Q > (t \alpha_{EQ} + w_Q l_Q) \alpha_{QQ} + t \alpha_{EE} \alpha_{EQ} + t \alpha_{EQ} + w_Q (1 + \sigma) l_Q + (t \alpha_{EQ} + w_Q l_Q) \pi,$$

condition de toute évidence plus restrictive que celle en (II.14), mais dont l'analyse est beaucoup plus complexe, pour un gain vraisemblablement faible en matière de bornage.

inflationniste provoque une telle hausse des prélèvements requis, indexés sur les prix, que les prélèvements sur le travail sont contraints d'augmenter.

III.3. Éléments d'analyse à technologie variable

Les raisonnements ci-dessus font l'hypothèse constante qu'hormis p_Q , p_E , σ et t l'ensemble des paramètres de l'économie simplifiée sont donnés. Notamment, les coefficients α_{QQ} , α_{EQ} , α_{QE} , α_{EE} , l_Q et π , implicitement dérivés de la minimisation des coûts d'une fonction de production non révélée *via* le lemme de Shephard, sont fixés, et on peut donc dire que l'on raisonne à technologie constante. Dans le même ordre d'idée, e_f et q_f , liés par l'identité de Roy à un arbitrage implicite des ménages, sont fixés. L'un comme l'autre de ces théorèmes économiques centraux indiquent cependant bien que les coefficients techniques comme les demandes marshalliennes sont fonctions des niveaux de prix. Il s'agit donc d'estimer dans quelle mesure la prise en compte de ces réactivités modifie les conclusions analytiques ci-dessus.

III.3.1. À prélèvements fixes

Nous procédons d'abord à l'étude du cas où le total des transferts par unité de bien composite est maintenu constant selon l'équation (II.7). Nous avons montré plus haut qu'à coefficients constants, une économie réaliste compatible avec ce modèle permettait toujours un recyclage favorable, avec un effet déflationniste systématique de la taxe. Nous rappelons au préalable, avec les mêmes conventions que précédemment, que :

$$p_Q = \frac{1}{n^*} ((e^* - e) t + w_Q l_Q + n) \quad (\text{II.28})$$

Commençons par étudier le cas où le coefficient de demande finale d'énergie e_f n'est pas constant, mais réagit à la variation de la taxe. Nous conservons les autres coefficients constants. La variation de e_f se traduit directement par une variation de e , puisque

$$e = \frac{\alpha_{EQ}}{1 - \alpha_{EE} - e_f}, \text{ d'où } \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{e^2}{\alpha_{EQ}} \frac{\partial e_f}{\partial t}.$$

La dérivation de p_Q défini en (II.28) donne :

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{1}{n^*} \left((e^* - e) - t \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (\text{II.29})$$

On reconnaît ici un premier terme égal à la dérivée de p_Q telle qu'elle a été calculée plus haut, et un second terme dû à l'introduction d'une réaction de e_f à la taxe. Ce second terme vient contrebalancer l'effet déflationniste de la taxe sur le système de prix, puisque la contraction de l'assiette fiscale de l'énergie consommée par les ménages limite le montant de prélèvements disponibles pour le recyclage. Rien n'interdit d'envisager un effet total net inflationniste, si le signe de la parenthèse est positif.

C'est le cas lorsque $-\frac{t}{e} \frac{\partial e}{\partial t} > 1 - \frac{\alpha_{EQ}}{e} \left(1 + \frac{\alpha_{EE}}{1 - \alpha_{EE} - \pi} \right)$, autrement dit si l'élasticité-prix directe de l'intensité énergétique de l'économie est plus élevée que le terme de droite. Ce terme est inférieur à 1, éventuellement négatif, et l'élasticité prix directe de l'intensité énergétique de l'économie est aussi susceptible d'être comprise entre -1 et 0 : il n'est donc pas exclu que cette inégalité soit satisfaite, et que la taxe puisse être inflationniste.

Étudions maintenant le cas où seul α_{EE} est réactif à la variation de taxe; nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_Q}{\partial t} = & \frac{1}{n^*} \left((e^* - e) - t \frac{\partial e}{\partial t} \right) \\ & + \frac{\alpha_{EQ}}{(n^*)^2} \left(n^* \frac{(1-\pi)t}{(1-\alpha_{EE}-\pi)^2} + \frac{\alpha_{QE}}{(1-\alpha_{EE}-\pi)^2} ((e^* - e)t + w_Q l_Q + n) \right) \frac{\partial \alpha_{EE}}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

Nous reconnaissons les deux premiers termes déjà identifiés, bien que $\frac{\partial e}{\partial t}$ ait ici une signification différente mais un comportement identique (puisque c'est α_{EE} qui est réactif à la taxe, nous avons cette fois $\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{e^2}{\alpha_{EQ}} \frac{\partial \alpha_{EE}}{\partial t}$).

Nous disposons ensuite d'un troisième terme dont le signe est celui de $\frac{\partial \alpha_{EE}}{\partial t}$, autrement dit toujours négatif (l'étude du signe de la parenthèse est triviale puisque $n > t e$). Ce terme correspond à l'effet déflationniste de la baisse de consommation intermédiaire d'énergie à cause de la taxe, *via* l'équilibre général des prix.

Enfin nous pouvons envisager les variations de coefficients dans la production de bien composite. En laissant libres α_{EQ} et l_Q , afin de pouvoir introduire les conditions de substitution travail-énergie, on obtient :

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{1}{n^*} \left((e^* - e) - t \frac{\partial e}{\partial t} \right) + \frac{1}{(n^*)^2} \left(\frac{n^* (1 - \pi) + \alpha_{QE} ((e^* - e) t + w_Q l_Q + n)}{1 - \alpha_{EE} - \pi} \right) \frac{\partial \alpha_{EQ}}{\partial t} + \frac{w_Q}{n^*} \frac{\partial l_Q}{\partial t} \quad (\text{II.31})$$

On observe ici quatre termes : les trois premiers sont similaires à ceux rencontrés dans le cas de α_{EE} , tandis que le dernier représente un effet inflationniste, dû au surcoût du travail dans la production de bien composite, après substitution de l'énergie vers le travail.

L'étude de ces deux derniers cas plus complexes soulève la question non-triviale de l'effet « net » de la taxe sur les prix : la somme algébrique des différents effets est un problème que l'analyse littérale ne suffit plus à résoudre. Le résultat va en effet dépendre des élasticités (élasticité-prix directe des coefficients, élasticité de substitution entre les facteurs) et des coefficients eux-même.

III.3.2. À prélèvements proportionnels

Nous pouvons effectuer des calculs analogues pour le cas des prélèvements proportionnels.

Commençons par étudier dans quelle mesure la prise en compte de la dérivée de e_f par rapport à t modifie les conclusions sur l'évolution de p_Q , via la variation de e . En différenciant (II.14) partiellement en fonction de t on obtient alors

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{e^* - e}{n^* - n} - \frac{t}{n^* - n} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (\text{II.32})$$

Dans cette expression, le second terme change de signe selon la valeur de n . On peut ici distinguer deux cas :

- si $\frac{\partial p_Q}{\partial t}$ est positif, autrement dit si la variation du montant de prélèvement sur l'énergie par unité de production de bien composite, $t \cdot e$, a un effet net inflationniste, alors la contraction de e ($\frac{\partial e}{\partial t} < 0$) lorsque t croît vient contrecarrer cet effet inflationniste;

- si $\frac{\partial p_Q}{\partial t}$ est négatif, autrement dit si la variation du montant de prélèvement sur l'énergie par unité de production de bien composite, $t e$, a un effet net déflationniste, alors la contraction de e lorsque t croît vient limiter le volume de prélèvement pouvant être recyclé pour alléger les charges sur le travail et finalement faire baisser le prix p_Q (cf. cas des prélèvements constants où cet effet existe aussi).

On peut donc conclure que les variations de e_f jouent un rôle compensateur dans la variation de p_Q , mais sans hypothèses supplémentaires il est impossible de dire dans quelle mesure l'effet contraire ainsi mis en évidence est susceptible de modifier le signe de $\frac{\partial p_Q}{\partial t}$.

Procédons de la même façon pour le coefficient α_{EE} , dont la dérivée par rapport à t peut comme celle de e être supposée négative. Nous obtenons une nouvelle expression de $\frac{\partial p_Q}{\partial t}$:

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{e^* - e}{n^* - n} - \Delta_1(t) \frac{\partial e}{\partial t} + \Delta_2(t) \frac{\partial \alpha_{EE}}{\partial t} \quad (\text{II.33})$$

en introduisant deux notations,

$$\Delta_1(t) \equiv \frac{t}{n^* - n} \quad (\text{II.34})$$

$$\Delta_2(t) \equiv \frac{\alpha_{EQ}}{(n^* - n)^2 (1 - \alpha_{EE} - \pi)^2} \left((1 - \pi) (n^* - n) t + \alpha_{QE} (e^* - e) t + w_Q l_Q \right) \quad (\text{II.35})$$

La dérivée à technologie fixe est donc cette fois modifiée par deux effets :

- un effet modérateur véhiculé par $\Delta_1(t)$, équivalent à celui observé dans le cas de la prise en compte des variations de e_f (atténuant la baisse ou la hausse de prix constatée au premier ordre par contraction de la nouvelle base fiscale);
- un second effet condensant en $\Delta_2(t)$ l'effet prix net de la variation de la consommation intermédiaire α_{EE} .

(II.31) indique que $\Delta_2(t)$ est positif (et donc le second effet déflationniste) pour les valeurs de n inférieures à $n^* - \frac{\alpha_{QE}}{1 - \pi} \left(e - e^* - \frac{w_Q l_Q}{t} \right)$. La droite affine matérialisant cette inégalité coupe l'axe des ordonnées au-dessus de n^* et passe par le point

$\left(e^* + \frac{w_Q l_Q}{t}, n^*\right)$, à l'image de la contrainte de p_E (fig. III.4). On en déduit que $\Delta_2(t)$ est toujours du signe opposé à celui de $\frac{\partial p_Q}{\partial t}$, et que l'effet sur le prix est dans le même sens que la dérivée à technologie fixe, pour un effet net à nouveau équivoque.

Enfin, considérons de nouveau la possibilité d'une substitution entre énergie et travail dans la production du bien composite. La dérivée du prix du bien composite (équation II.14) par rapport à la taxe doit alors tenir compte des dérivées partielles des coefficients α_{EQ} et l_Q , ce qui donne :

$$\frac{\partial p_Q}{\partial t} = \frac{e^* - e}{n^* - n} - \Delta_1(t) \frac{\partial e}{\partial t} + \Delta_3(t) \frac{\partial \alpha_{EQ}}{\partial t} + \Delta_4(t) \frac{\partial l_Q}{\partial t} \quad (\text{II.36})$$

avec $\Delta_1(t)$ tel que défini en (II.30), et en posant

$$\Delta_3(t) \equiv \frac{1}{(n^* - n)^2 (1 - \alpha_{EE} - \pi)} \left(\alpha_{EE} (n^* - n) t + \alpha_{QE} ((e^* - e) t + w_Q l_Q) \right) \quad (\text{II.37})$$

$$\Delta_4(t) \equiv \frac{w_Q}{n^* - n} \quad (\text{II.34})$$

On retrouve donc, agissant sur la variation de prix à technologie fixe, les deux effets contraires de contraction de la nouvelle assiette fiscale et de contraction de la consommation intermédiaire d'énergie, présents dans le cas d'une variation d' α_{EE} , ainsi qu'un effet supplémentaire : l'effet de substitution de l'énergie vers le travail, qui vient d'une part augmenter la contribution du coût salarial dans le prix du bien composite, d'autre part augmenter l'assiette des prélèvements sur le travail⁴⁵.

En définitive, il apparaît que, dans le cas général où l'on suppose tous les coefficients libres de réagir à la variation de la taxe, au moins deux catégories d'effets se superposent :

- des effets de propagation par le système des prix, qui relèvent de la modélisation en équilibre général et du bouclage croisé des prix;

⁴⁵ C'est bien la superposition de ces deux effets qui fait dépendre Δ_4 du signe de $(n^* - n)$, car l'effet d'élargissement de l'assiette renforce le gain du recyclage de la taxe et peut limiter une augmentation de prix lorsque l'on se trouve dans une économie où $n > n^*$.

- des effets de variation d'assiette—de la taxe carbone ou des prélèvements sur le travail—qui transitent par la loi de neutralité budgétaire retenue.

La résultante de ces deux effets n'est pas univoque, mais dépend des mesures relatives des élasticités des différents coefficients à la taxe.

On ne peut donc dans aucun des cas étudiés à technologie variable rejeter l'hypothèse que la dérivée du prix soit négative, et que les diminutions de bien-être mis en lumière dans le modèle analytique simple de Bovenberg soient contrés.

Conclusion

L'exercice analytique présenté ci-dessus dispense plusieurs enseignements. En premier lieu, il permet d'identifier les mécanismes d'équilibre général qui influent sur le comportement des prix face à la taxe sur l'énergie : effet de contraction de la demande, effet de substitution des facteurs, effet d'érosion de la base fiscale, effet d'inflation sur le niveau de prélèvements.

Dans un second temps, ses conclusions équivoques dans l'hypothèse de technologie variable (correspondant au cas retenu dans le modèle analytique de Bovenberg) ne permettent pas de rejeter l'hypothèse selon laquelle la diminution de bien-être mise en lumière hors représentation des prix de production soit contrée par leur prise en compte.

L'équivocité des résultats trouvés invite à dépasser le cadre analytique retenu pour procéder à des expériences numériques. Le modèle IMACLIM, dont la description fait l'objet du chapitre IV, est précisément conçu sur le format du modèle simple décrit ci-dessus au tableau II.1 et dans les équations (II.1), (II.2), (II.3), (II.4) et (II.9). Comme son image simplifiée, les évolutions du prix du bien composite qu'il calcule en équilibre général sont intimement liées aux hypothèses concernant les variations des coefficients de consommation d'énergie. Ces variations renvoient à la problématique de la modélisation des systèmes énergétiques, second champ de prospective à la source des divergences observées dans les résultats des modèles agrégés par SAP 12, qui fait l'objet du chapitre qui suit.

Chapitre III

**Systemes énergétiques
et signaux prix :**

**une controverse
technique**

Introduction

Les multiples catégories de coûts de limitation des émissions représentées dans la modélisation des politiques climatiques désignent des réalités très différentes :

- les **coûts techniques** désignent les coûts directs industriels et financiers du remplacement d'une technique fortement émettrice par une technique produisant un service équivalent en générant des émissions moindres (remplacement d'une centrale électrique à charbon classique par une centrale à gaz à cycle combiné, travaux d'isolation dans l'habitat, *etc.*). Ces coûts sont en général exprimés en termes de valeur actualisée de la technique sur l'ensemble de son cycle de vie. On qualifie généralement de mesures « à coût négatif » ou « sans regret » les projets dont la valeur actualisée est inférieure à la somme actualisée des économies d'énergie qu'ils permettent;
- les **coûts économiques sectoriels** dépendent, pour chaque secteur de l'activité économique, de caractéristiques comme le taux d'utilisation des capacités de production, lui-même lié à la cohérence de l'ensemble des mesures d'économies prises. Dans le domaine de l'énergie—et dans une moindre mesure des transports et de l'industrie—, on utilise des modèles sectoriels, tels EFOM ou MARKAL, pour comparer les coûts de ces ensembles de mesures suivant divers scénarios d'activité, elle-même mesurée par un nombre limité de paramètres macro-économiques exogènes (taux de croissance total de l'économie, structure de l'industrie). Ces modèles, dits « d'équilibre partiel », ne rendent pas compte des effets en retour sur le reste de l'économie.
- les **coûts macroéconomiques** mesurent l'impact sur le PIB, en équilibre général, d'un ensemble de politiques de réduction des émissions, qu'elles soient étendues à l'ensemble de l'économie ou restreintes à certains de ses agents. Dès lors que l'on considère des politiques au champs d'application restreint, leur calcul implique soit la mise en œuvre de modèles macroéconomiques purs suffisamment détaillés, soit le couplage de modèles sectoriels détaillés avec des modèles macroéconomiques souvent plus agrégés.
- les **coûts de bien-être** ne sont pas nécessairement corrélés avec les coûts macroéconomiques : le PIB agrège de nombreux éléments influençant le bien-être dans des sens *a priori* différents (investissement, consommation, dépenses

publiques, *etc.*), ne rend pas compte du caractère plus ou moins équitable de leur répartition, ou encore ne considère pas l'effet sur le bien-être de la dégradation de l'environnement local (cas de la pollution par l'automobile).

Une telle typologie ne présente pas qu'un intérêt taxinomique : un choix technologique bien compris nécessite la prise en compte de l'ensemble de ces coûts, ainsi une technologie efficace (coût industriel et financier bas) peut s'avérer contre-productive en cas de demande sectorielle contrainte (coûts sectoriels liés à la surproduction élevés); de même, une situation optimale au niveau sectoriel (subventions publiques en faveur d'un choix technologique efficace) peut entraîner des déséquilibres sous-optimaux à l'échelle macroéconomique (creusement des déficits publics).

En outre, elle a historiquement constitué une ligne de fracture séparant deux approches de la modélisation des systèmes énergétiques : l'approche *bottom-up*, qui s'attache à prendre en compte les coûts techniques et sectoriels, et l'approche *top-down*, qui se concentre sur les effets macroéconomiques et de bien-être.

I. ***Bottom-up* vs *top-down* : significations d'une controverse**

Même si, en toute rigueur, tel ne devrait pas être le cas, on ne peut nier que le choix de l'une ou l'autre approche de modélisation des systèmes énergétiques n'est pas indépendant de postures idéologiques : d'un côté, les tenants de politiques environnementales volontaristes soulignent l'existence de technologies plus efficaces que celles en place, et les possibilités de leur insertion dans l'économie; de l'autre, les tenants de la nécessité d'un recours au marché signalent les difficultés de la reconversion vers des technologies moins polluantes en raison de facteurs économiques ou comportementaux. Les auteurs phares de la première tendance (Lovins, Goldenberg *et al.*, Weizäcker, Sorensen, *etc.*) utilisent des évaluations globales tirées d'une agrégation de coûts techniques *bottom-up*, tandis que ceux de la seconde (Nordhaus, Manne, Richels, Edmonds, *etc.*) cherchent à rendre compte des conséquences macroéconomiques des mesures techniques pour en déduire les mesures d'incitation qu'elles impliquent (*top-down*).

Pour produire leurs évaluations, les modèles *bottom-up* se fondent sur l'analyse détaillée de potentiels techniques tirés de la mise en parallèle des coûts et des performances de technologies multiples. Ils tendent à donner une description très

détaillée du système énergétique, sans insister sur l'endogénéisation du comportement ni sur la description d'autres parties du système économique. Les modèles *top-down*, quant à eux, analysent des comportements agrégés (nombre limité de biens énergétiques et de secteurs), où les tendances générales de comportement et d'évolution technologique de long terme sont tirées du traitement économétrique d'indices de prix et d'élasticités. En revanche, par un bouclage des interactions entre les divers agents macroéconomiques, ils garantissent un traitement explicite de l'ensemble des effets produits par une décision sur l'économie nationale.

En conséquence, les modèles *bottom-up* conviennent mieux à la simulation des potentiels détaillés de substitutions technologiques (« exploration », qui permet de faire émerger les effets complexes, éventuellement contre-intuitifs, de différents scénarios technologiques) tandis que les modèles *top-down* sont mieux adaptés à la prévision d'effets économiques généraux (« prédiction », qui permet de mesurer l'écart à un scénario de référence produit par l'introduction d'une mesure). Tous les modèles ne correspondent pas totalement à l'une de ces deux catégories, et plusieurs « modèles hybrides », par exemple le modèle MERGE de Manne et Richels (1995), sont maintenant disponibles. L'intérêt d'une telle convergence est, notamment, de comparer les effets de différents scénarios, dont chacun représente un ensemble de mesures politiques cohérentes, par rapport à un scénario de référence correspondant à une « non action ».

II. Optimisme technologique contre pessimisme économique

Le classement *top-down/bottom-up* a été présenté comme l'opposition entre le pessimisme du « paradigme économique » et l'optimisme du « paradigme de l'ingénieur » (Grubb *et al.*, 1993).

Partant d'une description désagrégée des services énergétiques et des filières de transformation entre énergie primaire, énergie finale et énergie utile, la plupart des modèles *bottom-up*, ou technico-économiques, font apparaître un écart entre les meilleures technologies disponibles et celles couramment utilisées, principalement au niveau des équipements utilisateurs d'énergie, mais aussi, dans certains pays au moins, à celui des techniques de conversion entre énergie primaire et énergie finale. Dès lors, du point de vue de l'ingénieur, il est évident que les meilleures technologies

disponibles ne sont pas nécessairement adoptées : un « *efficiency gap* » sépare l'efficacité énergétique de l'équipement effectivement choisi par les consommateurs, et l'efficacité énergétique de la technologie qui pourrait théoriquement minimiser les coûts de la fourniture du service énergétique procuré. De toute évidence, ces « mesures à coûts négatifs » seraient à même d'abaisser les coûts globaux des réductions d'émissions, et par conséquent le niveau des signaux prix devant y conduire.

Le « pessimisme » des modèles *top-down* provient de leur méthode de calibrage économétrique, qui, en isolant les élasticités-prix sur la base de l'observation du passé, tend à leur déterminer une valeur faible. Par conséquent, ces modèles concluent souvent à des marges de manœuvre particulièrement limitées. Notamment, les premiers modèles *top-down* ont conclu que des taxes relativement élevées sur le carbone, aboutissant à des coûts économiques significatifs, seraient nécessaires pour contrecarrer les tendances actuelles des émissions.

On constate donc que la distinction entre approche *bottom-up* et approche *top-down* ne correspond pas tant à une différence de niveaux d'agrégation qu'à une représentation particulière de la technologie : l'approche *bottom-up* essaie de la décrire au sens de l'ingénieur, comme une technique explicite (l'acier des hauts fourneaux par opposition à l'acier à arc électrique, l'ampoule à incandescence par opposition à l'ampoule fluorescente) caractérisée par une performance technique et un coût direct mesurables; l'approche *top-down*, *a contrario*, représente la technologie au moyen des parts de certains intrants dans les consommations intermédiaires (par exemple, les produits de l'acier pour la fabrication des voitures) et par la répartition du produit des ventes entre le coût des intrants intermédiaires, le revenu du travail et le revenu du capital. Les élasticités des parts représentent, selon le choix de la fonction de production agrégée, le degré de substituabilité des intrants; une telle logique, quel que soit le niveau de désagrégation sectorielle représentée, n'explicitera pas les raisons techniques de la substitution, au risque de sous-estimer les possibilités de bifurcations technologiques et d'accélération de l'innovation qui leur sont liées, pour une appréciation généralement plus élevée des coûts de limitation.

Par ailleurs, les modèles *top-down* s'efforcent d'analyser les interactions entre les modifications du système énergétique et le reste de l'économie de la manière la plus exhaustive possible. Ce n'est qu'incidemment que cet objectif induit un niveau d'agrégation généralement plus élevé que celui des modèles *bottom-up* : la nécessité de stabiliser les systèmes d'équations économétriques utilisés exige des données d'une fiabilité et d'une cohérence que, bien souvent, seules des bases agrégées peuvent fournir. Il demeure que la capacité d'endogénéisation des modèles *top-down* permet

une meilleure prise en compte des phénomènes de rétroaction de l'ensemble de l'économie sur le système énergétique, que celle-ci soit négative (élévation des coûts de production, éviction de l'investissement au détriment des secteurs non énergétiques) ou positive (possibilités de recyclage efficace des taxes). Dans cette dimension supplémentaire à nouveau, les modèles *top-down* mettent en évidence des effets macroéconomiques souvent négatifs qui justifient des évaluations de coûts macroéconomiques supérieurs à ceux évalués par les modèles *bottom-up* sur la base d'une simple agrégation des coûts sectoriels.

II.1. Critique de « l'efficiency gap »

La principale critique formulée à l'encontre des modèles *bottom-up* concerne le niveau, voire l'existence des potentiels « sans regrets » liés au comblement de l'*efficiency gap*.

En premier lieu, soulignons que la notion même d'*efficiency gap* repose sur le postulat d'une imperfection des marchés : supposer l'existence de mesures permettant aux agents, à coût négatif ou nul, d'améliorer leur situation économique implique de toute évidence que le scénario de référence est à un équilibre sous-optimal.

Par ailleurs, en supposant que l'hypothèse d'imperfection des marchés soit vérifiée, celle-ci implique alors la nécessité de prendre en compte, d'une part, ces imperfections dans l'évaluation même des coûts de limitation, et d'autre part, des difficultés de mise en œuvre des mesures considérées non prises en compte par les marchés. À cet égard, les modèles *bottom-up* négligent le plus souvent, selon leurs détracteurs, de tenir compte :

- des coûts cachés d'une technique, qui se révèlent *a posteriori* lors de son utilisation (fiabilité, facilité d'usage, coûts d'entretien);
- de la complexité et de l'hétérogénéité des préférences des consommateurs, qui peuvent par exemple choisir, lorsque le trajet en transport collectif nécessite plusieurs changements, de se déplacer en voiture individuelle, malgré un coût supérieur pour un bénéfice effectif égal. De même, dans le domaine de l'éclairage, la préférence accordée, pour des raisons esthétiques, aux lampes à incandescence plutôt qu'aux lampes à fluorescence retarde significativement la pénétration de ces dernières mêmes si elles sont plus économiques. Dans le domaine de la production de nombreux obstacles se dressent sur le chemin de la

pénétration des énergies renouvelables, autant institutionnels (difficulté du financement) que techniques (complexité de la gestion des énergies décentralisées);

- des effets de rétroaction entre le progrès technique et les pratiques de consommation. En particulier, une efficacité énergétique accrue conduit les consommateurs, d'une part à consommer plus d'un service énergétique devenu moins cher, à dépense énergétique inchangée (effet revenu) et d'autre part, à modifier leur panier de consommation vers de nouveaux types de biens (effet de substitution), dont certains ont un contenu énergétique élevé, par exemple les transports aériens;
- des coûts de transaction induits par les réformes d'accompagnement des changements de technologie. Par exemple, dans le cas du développement du chauffage central, ceux liés aux modifications des règles juridiques de partage des responsabilités entre propriétaires et locataires;
- du coût des mesures d'aides financières à l'accès aux techniques plus efficaces, neutres au regard du taux d'actualisation social, mais à coût d'investissement plus élevé si l'on considère le taux d'actualisation propre au consommateur;
- des coûts de transaction liés à des impacts collatéraux au secteur considéré. Une réduction des transports routiers va rejaillir sur la consommation de carburants, provoquer une diminution des taxes perçues par la puissance publique, une diminution des droits de stationnement perçus par les municipalités, une diminution de l'activité des garages et stations-services, *etc.* Les mesures destinées à corriger ces effets induisent des coûts de transaction qui peuvent être importants.

Par conséquent, la notion d'*efficiency gap* doit être utilisée avec précaution et selon des objectifs bien déterminés. À l'encontre de cette mise en garde, le débat *bottom-up/top-down* a longtemps été marqué par des exercices de prospective technologique dessinant des futurs alternatifs, sans recours à l'énergie nucléaire et avec minimisation de l'usage d'énergies fossiles d'ici la fin du XXI^e siècle—scénario *Fossil Free Energy Future* de Greenpeace et du Stockholm Institute, scénario de Johanson, *Low Emission Supply System*, ou LESS, analysé par le second groupe de travail du GIEC. Ces exercices, en intégrant sur le prétexte de l'*efficiency gap* un AEEI (Autonomous Energy Efficiency Improvement) de 2% par an au lieu du 1% caractérisant les tendances passées, permettaient de ramener à une valeur proche de zéro les coûts d'une baisse de 15% à 30% des émissions des pays développés au cours du siècle prochain par rapport aux

niveaux actuels. Jae Edmonds, à l'aide du modèle SGM (Fisher-Vanden *et al.* 1993), a démontré combien les conditions de tenabilité macroéconomique du scénario LESS de Johanson étaient restrictives. Il faut toutefois insister sur le fait que le propos de tels scénarios, raisonnant en rétro-induction, est de fournir des enseignements utiles sur les liens entre l'ordre de grandeur des coûts de prévention et celui des paramètres, et non de fournir des prévisions permettant de conclure au réalisme des scénarios, en particulier quant aux modifications institutionnelles et aux schémas d'incitation nécessaires pour produire leurs conditions.

II.2. Limites de la réponse des modèles top-down

Nous avons déjà indiqué ci-dessus que les modèles *top-down* sont peu adaptés à la mise en évidence des ruptures de tendance dans les comportements et l'adoption de techniques nouvelles qui apparaissent sur le long terme. Ils sont en particulier déficients pour rendre compte de manière fiable des rétroactions qui se déroulent entre les incitations économiques et le changement technique : même si la distinction entre le progrès technique autonome et le progrès technique induit par les prix est théoriquement éclairante, son évaluation est très dépendante de procédés économétriques dont la fiabilité est loin d'être attestée.

En premier lieu, les chocs pétroliers ont été accompagnés systématiquement de mesures incitatives à la conservation de l'énergie et ont d'autre part été contemporains de changements profonds dans les structures de production industrielle. Il est donc difficile d'établir la part du progrès technique effectué sur cette période induite par la hausse des prix pétroliers.

En second lieu, une certaine confusion surgit du fait que les tendances « autonomes » ne proviennent pas seulement d'une recherche de l'efficacité énergétique, mais également de changements structurels dans la production, du progrès technique et de politiques d'efficacité énergétique non dépendants des prix.

Enfin, ces difficultés sont exacerbées par la nécessité théorique de bien distinguer, dans les effets prix, les poids relatifs des comportements d'optimisation de court terme (effets de substitution) et les innovations résultant de changements dans les anticipations de long terme : une variation soudaine de ces anticipations est susceptible d'entraîner des changements techniques irréversibles autrement importants qu'une

réponse réversible de court terme aux variations de prix. Notamment, le contre-choc pétrolier du milieu années 80 n'a pas rompu la tendance à l'amélioration de la consommation des moteurs automobiles amorcée dans la décennie précédente.

Techniquement, la plupart des modèles *top down* utilisent des fonctions décrivant des relations de type technologique et de comportements estimés à partir de séries temporelles passées. Rien ne garantit que les divers coefficients qui proviennent de ces estimations soient représentatifs des nouvelles technologies et des nouveaux comportements dont le surgissement est parfois rapide, à l'exemple de l'informatisation dans l'industrie et les services des pays développés, ou des pratiques nées de l'urbanisation dans les pays en développement. Par conséquent, les hypothèses de stabilité d'un certain nombre de relations utilisées par les modèles *top-down* pour décrire l'évolution de la production et des comportements sur le long terme ne paraissent pas justifiées.

Sur un plan plus technique, la représentation des technologies dans l'approche *top-down* se prête mal à une modélisation de l'adoption de techniques nouvelles :

- l'utilisation de fonctions de production, qui lient les demandes optimales de facteurs de production à leurs prix relatifs, implique une substituabilité excessive entre les intrants;
- la rigidité de la prise en compte de l'évolution technologique par un indice d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (synthétisant les causes d'évolution technologique dans le temps) ignore les réductions de coût qui résultent des effets d'apprentissage, des économies d'échelles ou des externalités de réseaux;
- les rigidités au changement du capital industriel, domestique ou collectif sont mal représentées dans les modèles agrégés;
- la représentation des préférences et leur lien avec les systèmes techniques énergétiques permettant de satisfaire les besoins finaux n'est pas suffisamment explicite dans les modèles agrégés.

Enfin, de manière plus fondamentale, les modèles *top-down* reposent nécessairement sur l'un ou l'autre de deux postulats théoriques :

- les marchés sont parfaits, donc les imperfections suggérées par les modèles *bottom-up* sont simplement dues à la complexité des préférences des consommateurs et à des coûts de transition cachés que la modélisation technique échoue à prendre en compte. Dans une telle perspective, toute

stratégie de réduction aura un coût positif et un recyclage de la taxe carbone pourra accroître les distorsions fiscales;

- les marchés ne sont pas parfaits, et des politiques « sans regrets » sont possibles qui mettent à profit des mesures permettant de s'affranchir des barrières à l'innovation et de baisser les coûts de transaction. Mais la modélisation *top-down* ne parvient alors pas à représenter les paramètres permettant de déterminer quelle réforme institutionnelle pourrait abaisser les coûts de transaction et supprimer les barrières s'opposant à l'adoption de techniques plus efficaces, voire réellement optimales. L'expérience des crises énergétiques des années 70 montre combien les politiques publiques d'information et de financement des programmes de recherche et développement ont pu influencer les adaptations dans le domaine énergétique, en particulier en matière de maîtrise de l'énergie. Les fondements empiriques de cette analyse proviennent d'études portant sur les impacts des programmes de maîtrise de la demande d'électricité sur les choix des consommateurs, des industriels et des alliés commerciaux (DeCanio, 1993; Howarth, Anderson 1993; Howarth, Winslow 1994; Koomey, Sanstad 1994; Krause *et al.* 1989; Levine, Sonnenblick 1994; Nadel 1992). Bien que leurs conclusions aient été remises en cause par certains critiques (Sutherland 1991; Joskow, Marron 1993), les auteurs de ces études laissent penser qu'il existe un potentiel à coûts négatifs susceptible d'être réalisé par des programmes bien conçus de maîtrise de la demande d'électricité. Dans cette perspective, le marché ne provoque pas les niveaux d'efficacité énergétique qui seraient économiquement avantageux, ni au niveau microéconomique des coûts financiers directs, ni à celui de coûts plus largement entendus. Les modèles *top-down* ne peuvent rendre compte des potentiels de réduction des émissions ainsi révélés, qui ne sont susceptibles d'être réalisés que par la combinaison de normes d'efficacité énergétique, de programmes d'étiquetage et d'audit, de réformes des réglementations pour une planification du service public au moindre coût, de mesures d'intéressement au profit dans les programmes de maîtrise de la demande du service public, de mesures d'incitation par le marché procurées par des programmes innovants de service public ou de politique publique d'achat.

II.3. Vers une conciliation des deux approches ?

Les analyses *bottom-up* sont certes plutôt le fait d'ingénieurs spécialisés dans la connaissance des potentiels thermodynamiques et des caractéristiques de consommation d'énergie des technologies nouvelles et naissantes. Mais ces ingénieurs, entraînés par la confrontation avec les autres approches, ont peu à peu essayé d'intégrer une dimension d'analyse plus économique, dans une volonté d'adopter le langage de leurs adversaires : montrer comment une politique appropriée permet de diminuer les coûts de transaction et les risques qui s'opposent à la pénétration des produits efficaces; démontrer que ces coûts de transaction sont en général plus faibles que ne le supposent les entreprises et des ménages mal informés. Ils ont étoffé leurs modèles d'indicateurs plus sophistiqués que les simples coûts techniques par unité énergétique, pour une meilleure description des comportements réels de consommation, et une meilleure prise en compte des nombreuses études économiques relatives aux signaux tarifaires et aux programmes d'efficacité énergétique, soulignant les coûts administratifs de ces programmes. De manière plus précise, la sophistication des études *bottom-up* concerne :

- l'analyse technique : c'est particulièrement vrai pour ce qui est des améliorations d'efficacité de la demande. D'un côté, des études plus détaillées ont tendance à dégager des potentiels « sans regrets » supérieurs; de l'autre, les analyses peuvent diverger quant à la performance réelle des différents types d'équipements d'usage final;
- les coûts administratifs : dans la mise en place de normes d'efficacité—l'instrument « historique » de l'analyse *bottom-up*—ils n'étaient à l'origine pas pris en compte; ils le sont de plus en plus, depuis des valeurs négligeables (Krause, 1994; Eto *et al.*, 1994) jusqu'à des impacts considérables (Joskow et Marron, 1993) en fonction principalement du type de mesures incitatives impliquées.
- l'efficacité des politiques : coûts de transaction et de transition modèrent la règle d'un glissement total vers des équipements efficaces en l'espace d'un cycle de rotation du capital (dix à vingt ans), en fonction de contraintes politiques et institutionnelles susceptibles de repousser cet horizon à quarante ans ou plus.

De leur côté, les tenants de l'approche *top-down* ont eu tendance à abandonner l'utilisation de paramètres calés par économétrie sur des séries temporelles et à introduire, comme on l'a vu, un indice d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique comme paramètre de commande aux côtés des élasticités prix classiques. Au-delà de ses limitations intrinsèques (cf. *supra*), cette approche nouvelle fournit l'occasion d'un couplage entre modèles *bottom-up* et modèles *top-down* : il suffit de caler les paramètres d'amélioration autonome des seconds sur les résultats des premiers.

Toutefois, cette manière d'inclure de l'information *bottom-up* dans les approches *top-down* pose un problème réel dans le cas de modèles calibrés économétriquement : s'écarter de la discipline économétrique pour certains paramètres ne garantit plus la stabilité des autres liaisons conservées dans le modèle. En fait, si le couplage des deux approches de modélisation peut donner des informations intéressantes pour des niveaux de taxe faibles—ou des niveaux modérés d'abattement des émissions de CO₂—son utilisation pour l'étude de politiques plus ambitieuses nécessite certaines précautions. On retombe ici sur le malentendu concernant la façon dont chaque approche traite la technologie : couplage ou pas, il demeure très difficile de relier la conception *top-down* de la technologie, abstraite, à celle tout à fait concrète de l'ingénieur, qui est véritablement celle sur laquelle on veut fonder l'évaluation des politiques climatiques. De manière très significative, les conclusions de Jorgenson (1984) sur la corrélation négative entre le changement technique et les prix de l'énergie dans l'économie américaine, et celles de Hogan et Jorgenson (1991) sur l'observation des innovations accélérées au niveau technique, divergent : pour un ingénieur, l'innovation implique en soi une efficacité technique accrue donc une plus grande productivité; pour un économiste, la croissance de la productivité est liée à bien d'autres facteurs que les seules caractéristiques technologiques : une demande ralentie ou des incertitudes croissantes peuvent engendrer une plus faible productivité économique, même si les équipements ont une efficacité technique très élevée. Les deux descriptions ont un sens, mais chacune saisit un aspect différent du changement technique.

Les divergences des résultats des analyses *top-down* et *bottom-up* sont donc enracinées dans une interaction complexe entre des différences d'objectifs, de structures de modélisation et d'hypothèses d'entrée. Bien que la tendance croissante à l'hybridation des deux approches diminue l'importance des structures de modélisation dans les résultats obtenus, la distinction fondamentale de perspective demeure, et la question de l'optimisation de l'efficacité énergétique par les marchés demeure entière. Au-delà des

particularités techniques de chacune des deux approches, des éléments de réponse à cette controverse résident dans la compréhension des déterminants du changement technique induit.

III. Au cœur de la controverse : le changement technique induit

La création du concept de changement technique autonome a constitué une étape théorique importante en matière de modélisation énergétique, en introduisant l'idée que les prix ne sont pas les seuls déterminants des évolutions techniques. L'AEEI constitue un artefact de modélisation intéressant dans la mesure où il permet d'englober les changements structurels de l'économie, les effets liés au progrès des connaissances et ceux de politiques publiques qui ne passent pas par les prix, comme les normes ou les réformes du fonctionnement des marchés. Mais il peut aussi, mal compris, suggérer à l'inverse que les prix ne jouent aucun rôle dans les incitations, voire que le changement technique est une manne céleste qu'aucune politique ne paraît susceptible d'influencer dans le sens d'une accélération de l'orientation vers certaines technologies⁴⁶.

Or, il est très difficile historiquement de distinguer de façon nette entre signaux-prix et autres déterminants du changement technique. Pour revenir à l'exemple des chocs pétroliers, l'explosion des cours du baril a déclenché quantités de politiques publiques en matière de recherche et développement, de normes, d'information des consommateurs, et il serait contestable d'attribuer le découplage entre énergie et croissance aux seuls signaux prix. Toutefois, ces politiques d'accompagnement n'auraient sans doute pas vu le jour hors le bouleversement des prix relatifs. En fait, l'articulation des signaux prix avec d'autres instruments de politique publique mérite un examen plus approfondi, et ce d'autant plus dès lors que le changement technique est analysé en reprenant les leçons de la théorie de la croissance, soit comme un processus endogène au sein duquel les externalités de réseaux, l'apprentissage par la mise en œuvre (*learning by doing*), le rendement d'échelle et le rendement d'adoption jouent un rôle majeur.

⁴⁶ Cette perception extrême est à la source du débat sur le *timing* des politiques climatiques : des positions de « laisser-faire » préconisent le retardement de toute action, des solutions au problème radicales et à bas coût ne pouvant manquer de survenir (GIEC 1996).

En pratique, le seul changement technique à être réellement autonome est l'émergence périodique non prévisible d'inventions ou d'innovations (comme la pénicilline), qu'elles surgissent de l'activité d'un chercheur isolé ou de grands programmes de recherche et de développement. On peut encore du point de vue strictement analytique représenter ce progrès technique comme endogène si l'on considère le lien entre R&D et innovation : la recherche et développement est financée et trouve sa contrepartie le jour où son produit technologique, enfin prêt, s'approprie l'intégralité du marché concerné sur ses qualités propres, voire sur intervention publique, avec un effet direct de baisse des coûts de production.

La majorité des innovations relève toutefois du changement technique induit et, comme c'est le cas dans le domaine qui nous préoccupe ici, dans la mesure où il porte sur un nombre très important de produits et exige des efforts centralisés, sont expliquées pour une grande partie par la conjonction de la baisse des prix et de l'extension des marchés. De ce point de vue, les prix ont un double rôle :

- un rôle d'allocation à court terme : les agents arbitrent en faveur de la technologie la moins coûteuse à niveau d'information donné;
- un effet signal de long terme : l'orientation de l'investissement à chaque renouvellement des équipements ainsi que celle de la recherche et développement sont modifiées. Certains travaux, notamment ceux menés par Gately (1992), montrent que l'on peut mettre en évidence économétriquement l'effet mémoire joué par les signaux, qu'il s'agisse de prix ou de normes. Dès lors on peut démontrer que le profil temporel des signaux et leur stabilité comptent tout autant que leur ampleur. Concrètement, une hausse programmée et anticipée des prix de l'énergie sur 10 ans n'a pas le même effet qu'une série de chocs erratiques à la hausse et à la baisse conduisant au bout du compte au même relèvement.

L'introduction d'un changement technique induit a plusieurs implications sur les résultats des modèles :

- elle modifie le profil temporel de la réduction des coûts, en favorisant la précocité de l'adoption de techniques nouvelles même si elle ne modifie pas le coût permanent de la réduction dans la mesure où celui-ci ne dépend que des hypothèses sur les coûts de la technologie ultime, dite « backstop »;
- elle réduit l'incertitude, ce qui accélère le progrès technique. La capacité à mieux prévoir les coûts du changement technique réduit les risques de devoir

supporter le coût d'opportunité du changement technique et les effets d'éviction entre technologies. Cela souligne l'importance des signaux réguliers de longue période sur les prix qui permettent de stabiliser les anticipations des agents.

- elle améliore l'efficacité des programmes de recherche et développement, puisque celle-ci dépend directement du niveau cumulé de la réduction, c'est-à-dire du taux d'utilisation des technologies nouvelles, lequel détermine le nombre d'essais et d'erreurs qui permettra aux technologies supérieures de s'imposer.
- elle met en évidence les risques de processus de verrouillage (*lock-in*) technique, soit de blocage des innovations sur certains marchés.

Encore faut-il disposer d'une vision claire de ses moteurs et de ses inerties.

IV. Inertie des systèmes techniques et des structures de consommation

Le changement technique interagit de manière complexe avec les systèmes techniques existants. D'une part, accélérer la reconversion du capital vers des technologies moins émettrices ajoute le coût du remplacement prématuré des anciens équipements à celui de l'installation des nouveaux équipements. D'autre part, plus l'inertie des systèmes d'équipement est importante, plus il semble raisonnable de commencer tôt leur remplacement. Une typologie fonction des modes et des cycles de consommation sous-jacents permet un éclairage de ces questions; on peut distinguer :

- les équipements liés aux usages finaux : la rotation du capital est comprise entre quelques années et vingt ans, les décisions sont prises par des agents privés. Le rapport coût-performance joue un rôle majeur dans la décision d'investissement.
- les équipements d'infrastructure et les processus industriels : cette catégorie comprend les bâtiments, les grands systèmes de transport et l'infrastructure industrielle dont la durée de vie est comptée en décennies. Elle renvoie à des décisions lourdes prises de manière plutôt centralisée, où les aspects énergétiques sont dominés, dans la décision d'investissement, par des questions de compétitivité et d'innovation technique; par exemple, dans le domaine des transport, par la rapidité, la non rupture des flux...

- l'usage des sol et l'urbanisme : la planification urbaine et l'utilisation de l'espace possèdent de nombreux déterminants (spéculation immobilière, répartition spatiale des activités économiques, *etc.*) qui les situent très au-delà d'une simple question de remplacement de capital.

L'inertie des systèmes économiques résulte des interactions entre les dynamiques d'équipement de ces trois catégories. En particulier, les questions énergétiques dépendent largement des formes urbaines (conditionnement de l'air, transport...), pour lesquelles on peut imaginer des transformations profondes, mais d'autant plus coûteuses qu'elles seront rapides. En outre, le secteur des transports est celui qui soulève le plus de questions : il est l'un des secteurs les plus émetteurs et l'un de ceux qui croissent le plus vite. Son évolution provoque des innovations de produits qui modifient peu la structure des modalités de déplacement, tandis qu'elle induit par les politiques publiques des innovations de système (intermodalité, développement des transports en commun), de potentiel important mais supposant de profondes transformations macroéconomiques qui les handicapent fortement. Enfin, les modifications technologiques radicales dans certains secteurs structurants pour l'économie peuvent avoir des conséquences sur l'ensemble du système de production.

En dernier lieu, la résistance au changement technique est accentuée par des comportements psychologiques de conservatisme (Robinson 1991, Lutzenheiser 1993, Schipper 1995).

La modélisation de ces réactions qui, tantôt s'opposent, tantôt se renforcent réciproquement, est particulièrement problématique et suggère pour le moins, dans l'élaboration des scénarios technologiques, des regroupements d'options cohérentes entre elles.

V. Modes de développement socio-économiques actuels et futurs et incertitudes sur les coûts

La prise en compte des questions et considérations discutées ci-dessus ne suffit pas à expliquer les différences entre les trajectoires de développement, ni celles constatées entre les courbes des coûts de réduction des émissions et d'adaptation de différents pays. Ces différences relèvent de choix d'ordre politique plus ou moins explicites qui

renvoient aux caractéristiques historiques, structurelles et conjoncturelles des pays et dépassent les seules considérations de politique énergétique et environnementale.

V.1. Déterminants des trajectoires de développement

Il existe quatre grandes catégories de déterminants expliquant les choix et modes de développement d'un pays :

- contenu en matériaux et en énergie de la structure de production. Les émissions des gaz à effet de serre d'un pays sont largement déterminées par son intensité en matières premières, soit la quantité de matériaux et d'énergie utilisée par unité d'activité économique. Durant les dernières décennies, cette intensité a considérablement baissé dans les pays développés (Bernardini et Galli, 1993; Williams, 1987) sous les effets du développement de l'économie de services et notamment de l'essor des nouvelles technologies de l'information (Chen 1994; Selvanathan, Selvanathan 1994);
- infrastructures d'énergie, de transport et planification urbaine. La consommation d'énergie du secteur des transports est à l'origine d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre, et son taux de croissance est en général plus élevé que pour les autres catégories de demande d'énergie. Aux États-Unis, par exemple, les augmentations d'efficacité énergétique des voitures particulières étaient, dans les années 1970 et au début des années 1980, presque exactement compensées par les augmentations des distances parcourues par véhicule, de sorte que la consommation d'énergie totale est restée constante (Schipper et Howarth, 1990). Les types et quantités d'émissions des transports sont fonction de la demande (les distances parcourues), du mode choisi (automobile, air, bus, rail), de l'efficacité des véhicules et des types de combustibles utilisés. Les deux premiers de ces déterminants sont fortement influencés par la taille et la configuration des zones urbaines, et les influencent à leur tour (Newman, Kenworthy 1989) : emplacement des domiciles par rapport aux lieux de travail, établissements scolaires et commerces de détail ; répartition des commerces de détail et des activités industrielles dans la région ; réseaux routiers et ferroviaires au sein des zones urbaines et entre celles-ci ; investissements dans les systèmes publics de transit et choix de ces derniers.

Ces facteurs peuvent se combiner très différemment, et les transports sont sans doute un domaine où des bifurcations vers des trajectoires très contrastées dans différentes régions du monde sont les plus susceptibles de se produire.

- géographie des activités et des hommes. Les changements dans les modes d'usage des sols et des établissements humains provenant des activités agricoles et de sylviculture, ainsi que des migrations au sein des campagnes et de l'exode rural, sont parmi les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre dans les pays en développement. Dans ce domaine plus qu'ailleurs, il est important de considérer les réductions d'émissions de GES dans des stratégies de développement plus globales, par exemple la défense de la biodiversité, plutôt que pour elles-mêmes.
- « effet tunnel » dans les pays en voie de développement. Les hypothèses faites sur les modes de développement revêtent une importance particulière dans le cas des pays en voie de développement. En effet, une majeure partie de l'infrastructure nécessaire pour le développement est encore à construire et l'éventail des futures options est considérablement plus étendu que dans les pays industrialisés. On ne peut pas supposer que les pays en voie de développement suivront automatiquement les trajectoires de développement passées des pays industrialisés. Notamment, les choix technologiques, tant dans le secteur de la production que celui de la consommation, peuvent modifier considérablement des paramètres cruciaux, tels l'élasticité de la demande en énergie par rapport au PIB, et l'expérience montre que les pays qui s'engagent sur la voie du développement ont généralement eu des profils énergétiques plus bas que les pays qui se sont développés plus tôt. En outre, dans bon nombre des pays considérés, la distribution spatiale de la population et des activités économiques n'est pas encore fixe : un cheminement direct à des modes de développement à plus faible intensité énergétique est *a priori* possible, c'est ce qu'on appelle « l'effet tunnel » (Berrah, 1983). Ces possibilités induisent des modes de développement très différents, que la théorie du développement n'a pas encore réussi à modéliser de manière satisfaisante.

V.2. Enjeux liés à la multiplicité des scénarios de référence

La diversité des facteurs explicatifs des trajectoires de développement précédemment décrite implique d'une part la multiplicité des modèles de développement possibles, et d'autre part la complexité des déterminants des niveaux d'émissions de gaz à effets de serre et des coûts de réduction, au point de mettre en question la capacité des modèles économiques à rendre compte de cette diversité et de ce niveau d'incertitude. Un consensus croissant insiste sur la nécessité de travailler sur des scénarios de référence multiples, lorsque des horizons à long terme sont considérés. Ces scénarios doivent représenter des ensembles cohérents d'hypothèses, concernant les facteurs discutés ci-dessus, plutôt que de simples variantes d'un scénario de référence créées par la modification des paramètres d'entrée d'un modèle donné. Il ne s'agit pas de prévoir ce que seront les résultats à long terme les plus probables, un exercice que bien peu ont réussi (Ascher 1978, 1990), mais d'examiner la faisabilité économique et technique de trajectoires de développement très différentes, et les coûts qui y sont associés. Ceci permettrait, par exemple, de répondre à la demande fréquente d'élaboration et d'analyse de scénarios de « développement durable », qui traduisent des hypothèses sur les trajectoires de développement économique et technologique et les « changements de modes de vie » très différentes de celles incluses dans les analyses traditionnelles.

Les limites des méthodologies actuelles mettent en relief la nécessité de clarifier les types de déterminants structurels qui sont implicitement pris en compte dans chaque scénario de référence, et ceux qui sont considérés comme fixes, ce qui exige :

- d'une part, d'approfondir les tests de sensibilité des résultats aux paramètres les plus incertains,
- d'autre part de procéder à des tests de « viabilité » assurant la cohérence globale des tendances projetées à long terme au regard des contraintes financières, politiques et institutionnelles.

Au-delà de ces difficultés techniques, l'existence de multiples scénarios de référence pose deux questions majeures :

- l'impossibilité de comparer les estimations des coûts effectuées depuis des scénarios de référence différents. Par exemple, un scénario de limitation élaboré à partir d'un scénario de référence dont les hypothèses englobent des améliorations substantielles de la qualité de l'air, pour des raisons

indépendantes du changement climatique, donnerait probablement des estimations de coûts plus élevées par unité de réduction, qu'un scénario de limitation élaboré à partir d'un scénario de référence ne prévoyant pas de telles améliorations. De plus, étant donné les difficultés à intégrer les rétroactions entre les modes de développement et les variables économiques, un scénario de référence qui donne lieu à des estimations de coûts plus faibles ne peut pas être interprété comme étant économiquement supérieur aux autres scénarios de référence. Ces différents scénarios de référence représentant différentes trajectoires de développement, chacune étant potentiellement un scénario « efficace », ils ne peuvent être comparés directement, et aucune évaluation globale de coûts relatifs n'est possible. La question des coûts relatifs (par exemple, les coûts de transaction ou les coûts politiques) associés à ces différents scénarios de référence, reste par conséquent sans réponse.

Ce problème est loin d'être purement théorique. Ainsi, si le débat sur le changement climatique était apparu en 1973, juste avant la décision de lancer le programme nucléaire en France, toute estimation des coûts de limitation aurait considéré deux scénarios de référence : le premier aurait exclu le programme nucléaire et aurait, par conséquent, prévu un niveau d'émissions de CO₂ plus élevé, auquel cas le coût du programme nucléaire aurait pu être inclus dans les coûts de limitation; le second aurait inclus le programme nucléaire, et les émissions et les besoins de limitation auraient, par conséquent, été plus faibles. Paradoxalement, cependant, les coûts d'une réduction incrémentielle des émissions, de 20 % par exemple, auraient été bien plus élevés. Et finalement, le choix nucléaire n'aurait pas été fait, dans la pratique, pour des raisons purement liées au climat.

Par conséquent, la meilleure stratégie analytique est de reconnaître que différents scénarios de référence sont possibles, et que toute estimation de coûts de limitation n'est pertinente qu'à la marge de chaque scénario de référence et non en termes absolus.

- la difficulté d'évaluer la signification des scénarios de référence. La fonction des scénarios de référence dans les études de coûts est de fournir une base de comparaison pour le calcul des coûts de limitation. Il est important de garder à l'esprit que de tels scénarios de référence supposent une distinction quelque peu artificielle entre un « laisser-faire », où aucune politique de limitation des émissions n'est instituée, et la mise en place d'une politique particulière. Bien qu'une telle procédure soit nécessaire pour obtenir une base de comparaison, et

donc une estimation des coûts de l'action, cela n'implique rien en principe sur la probabilité ou l'efficacité énergétique relative du scénario de référence, comparé au cas où une politique est mise en place.

Un problème similaire se pose quant à la distinction classique entre l'adaptation au changement climatique et la limitation de celui-ci. À court terme, le sens de cette distinction est clair : limitation signifie réduction des sources d'émissions et/ou augmentation des puits de GES, tandis qu'adaptation signifie amélioration de notre capacité à résister aux changements du système climatique mondial. À plus long terme, cependant, la distinction entre la limitation et l'adaptation commence à s'estomper : non seulement les mesures adoptées pour atteindre un objectif ont des conséquences significatives pour l'autre objectif (par exemple, des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique adoptées pour réduire les émissions, peuvent rendre les systèmes énergétiques plus résistants face à la variabilité du climat), mais de nombreuses politiques adoptées pour d'autres raisons, auront des effets d'adaptation et de limitation (par exemple, des décisions relatives à la planification urbaine). De ce point de vue, la distinction entre les scénarios de référence et les scénarios d'action devient artificielle, puisque la vraisemblance d'un scénario où même les actions d'adaptation seraient absentes est limitée.

L'importance respective des scénarios de référence et des scénarios d'action repose sur l'étude attentive de ce en quoi ils diffèrent, et non sur une comparaison de leur plausibilité ou de leur vraisemblance prédictive respectives.

Conclusion

La confluence de ces problématiques et de celles soulevées au chapitre II définissent un cahier des charges d'une ampleur considérable pour les chantiers de la modélisation énergétique et économique. Cette constatation plaide en faveur d'outils de modélisation intégrée permettant de dépasser, sur la base des outils de calcul existants, les contraintes de résolution analytique et de faire dialoguer les différents modèles en consolidant conjointement les productions des uns et des autres.

Les deux chapitres qui suivent présentent le modèle d'équilibre général calculable IMACLIM, spécifiquement conçu pour traiter de la manière la plus explicite possible la double controverse décrite ci-dessus en couplage avec un modèle *bottom-up*. L'objectif premier d'IMACLIM, à contre-courant de la majorité des exercices de

modélisation les plus en vue, n'est pas de réduire les incertitudes caractéristiques des politiques climatiques, en élaborant des scénarios considérés comme les plus probables « en l'état actuel des connaissances », mais plutôt de révéler ces incertitudes, en mettant en lumière et en discutant les énoncés scientifiques, les simples conjectures, voire les projets normatifs sur lesquels repose la multiplicité de scénarios possibles. En dernière analyse IMACLIM couplé à différents modèles *bottom-up*—ou synthétisant un espace de vraisemblance de leurs résultats, comme au chapitre VI ci-dessous—doit permettre :

- d'effectuer un tri parmi les origines des divergences observées dans les nombreuses évaluations disponibles, voire de mettre à jour les hypothèses sous-tendant des prises de position sans fondement analytique apparent;
- de cerner les résultats invariants, tendances lourdes, points de passage obligés, robustes à des variations paramétriques larges.
- de borner le champ des possibles incluant ces invariants, grâce à certains garde-fous empêchant la multiplication à l'infini des scénarios possibles.

Au premier rang de ces garde-fous, soulignons la mise en cohérence économique et technique des hypothèses sur les tendances et les variables de contrôle représentées dans IMACLIM et le modèle *bottom-up* couplé : dans la lignée des raisonnements du chapitre III, la modélisation en équilibre général doit se garder de perdre de vue la réalité physique des phénomènes qu'elle représente, au-delà du leurre confortable de la simple division de grandeurs nominales par des prix.

Le quatrième chapitre présente les spécifications d'équilibre général retenues dans IMACLIM, en insistant sur les traits saillants qui lui permettent de répondre aux interrogations soulevées au chapitre II.

Le cinquième chapitre s'étend longuement sur les modalités du couplage entre IMACLIM et un modèle de prospective énergétique *bottom-up*, qu'il développe dans le cas d'une articulation avec le modèle POLES de l'IEPE⁴⁷.

L'esprit gouvernant l'articulation IMACLIM-POLES est celui d'une véritable imbrication, avec modification de la nature de chacun des deux modèles. La lettre s'en écarte encore, puisque seule la prise en compte des enseignements de POLES dans IMACLIM est pleinement développée à ce jour, tandis que le bouclage en retour—

⁴⁷ Cf. <http://www.upmf-grenoble.fr/iepe/Recherche/Rech5.html>.

validation macro-économique des projections de référence de POLES, mais aussi de la cohérence des réactivités calculées, notamment en termes de rareté du capital productif—n'est encore qu'ébauché. Toutefois, on dépasse d'ores et déjà le stade d'une simple mise en parallèle, où le modèle technique se cantonne à un modèle d'offre énergétique et fait office de module dans le cadre macro-économique⁴⁸ : toutes les conclusions de POLES qui peuvent l'être sont traduites dans le langage d'IMACLIM et reproduites le plus fidèlement possible⁴⁹. Le propos du chapitre est alors de déterminer dans quelle mesure l'utilisation de spécifications de forme plus courantes modifie les résultats obtenus dans l'évaluation des politiques climatiques.

⁴⁸ C'est le cas pour les modèles MARKAL-MACRO (Manne *et al.* 1992), MERGE (Manne *et al.* 1995) ou GRAPE (Kurosawa *et al.* 1999), ou encore de travaux plus théoriques (Böhringer 1998), représentatifs de l'état du dialogue *bottom-up/top-down*.

⁴⁹ Le chapitre II ne traite en fait qu'une partie de ces spécifications; on pourra se reporter en fin d'annexe générale pour en découvrir l'ensemble—ainsi d'ailleurs qu'une formulation *ad hoc* différente, préférée à celle utilisée ici car plus contrôlable.

Chapitre IV

Le modèle IMACLIM

Introduction

Il est apparu au fil du chapitre II, mais aussi au chapitre précédent, que la mesure du deuxième dividende dépend de paramètres d'appréciation numérique difficile : effets de distorsion des fiscalités en place, réactions du marché du travail à une baisse des charges, potentiels techniques, effets dynamiques d'incitation, effets d'éviction entre changement technique biaisé et progrès technique général. S'ajoutent bien évidemment les impacts sur la compétitivité internationale en cas de mesures unilatérales. Les controverses sur chacun de ces points sont affaire de données techniques, de choix de formes fonctionnelles, de conjectures sur les potentiels des technologies, mais aussi plus fondamentalement de « théories » sur le fonctionnement des marchés ou sur la dynamique de croissance.

Il importe bien sûr que la recherche se poursuive pour réduire les controverses théoriques et les incertitudes paramétriques. Mais conditionner l'obtention de résultats à même d'orienter les politiques climatiques à un consensus sur des sujets aussi divers interdirait pour longtemps tout éclairage économique sur l'écofiscalité. En matière de croissance en particulier, les nombreuses tentatives pour dépasser les modèles « à la Solow » n'ont pas débouché jusqu'ici sur une théorie unifiée, produisant : modèles à effets d'hystérésis où des régimes stabilisés différents peuvent résulter de chocs transitoires, modèles régulationnistes où l'accent est mis sur les institutions et le changement du mode de gestion des firmes et du rapport salarial, théorie de la croissance endogène (Aghion, Howitt 1998). Or le choix entre ces représentations de l'économie n'est pas neutre par rapport à la thématique du double dividende; ainsi, un modèle de type Kaldor-Verdorn ou un modèle néo-kaleckien (Bowles, Boyer 1995), où une hausse exogène des salaires réels améliore la compétitivité hors prix et rend la croissance plus autocentrée, dénoteront un effet de relance supérieur à celui mis en évidence par un modèle néo-classique centré sur les effets d'offre et où les salaires sont totalement flexibles.

En conséquence, l'approche de modélisation retenue est de prendre acte de l'existence de ces débats pour montrer qu'ils n'interdisent pas, sur la base d'un accord sur quelques principes généraux de cohérence économique d'ensemble, de délimiter un éventuel domaine de validité du double dividende. Dans cette perspective il convenait de se doter d'un outil assez flexible pour représenter les diverses thèses en présence et procéder par raisonnement systématique en variante. Ceci explique notre choix de

procéder à une analyse en statique comparative de la déformation d'un sentier d'équilibre de long terme, sachant que cet équilibre peut correspondre à des « visions du monde » différentes et à des valeurs divergentes de paramètres dynamiques majeurs.

I. Schéma directeur

IMACLIM est un modèle d'équilibre général calculable qui opère par statique comparative la projection des équilibres d'une économie, puis la déformation de ces équilibres à l'horizon de projection selon la mise en œuvre d'une contrainte carbone par les quantités ou les prix (fig IV.1).

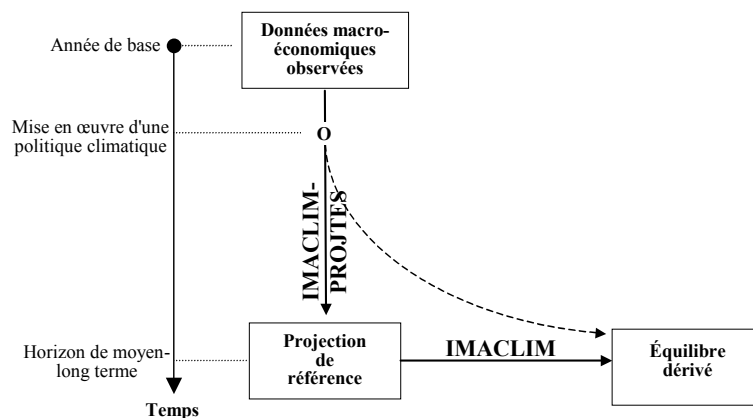


Figure IV.1 Le modèle IMACLIM

L'analyse des impacts d'une politique climatique donnée se fait donc en deux temps :

- projection par IMACLIM-PROJTES—qui n'est autre qu'une version simplifiée du modèle complet—d'un tableau entrées-sorties (TES), à un horizon qui soit assez distant pour rendre tenable l'hypothèse selon laquelle l'économie se situe à nouveau sur un sentier de croissance équilibré malgré la perturbation introduite à court terme. La projection est spécifiquement conçue pour intégrer les évolutions du système énergétique calculées par tout modèle *bottom-up*, en garantissant une double cohérence en quantités et en prix.

- déformation par IMACLIM de cette projection « de référence »—hors contrainte carbone—selon la politique étudiée, et à nouveau en cohérence avec les enseignements de l'analyse *bottom-up* (cf. annexe IV.2). L'analyse statique est par définition muette concernant le cheminement—en pointillés fig. IV.1—suivi par l'économie considérée entre la mise en œuvre de la politique analysée et l'horizon retenu⁵⁰. Simplement on constate que l'ensemble des contraintes imposées par, d'une part les équations d'équilibre général en quantités et en prix représentées dans IMACLIM, et d'autre part les informations concernant le système énergétique tirées d'un modèle *bottom-up* suffisent, avec un minimum d'hypothèses *ad hoc* (comme la constance de certains comportements économiques entre les deux équilibres), à calculer un nouvel équilibre.

La construction et la projection d'un TES dans le format IMACLIM, qui suppose un traitement de données assez lourd, est détaillée en annexe dans le cas de la France et d'une articulation avec le modèle technico-économique POLES de l'IEPE. Insistons cependant, dans le prolongement des raisonnements présentés au chapitre III, sur l'importance de la mise en cohérence entre les projections énergétiques des modèles technico-économiques et les projections économiques d'IMACLIM, préalable à toute analyse en statique comparative. Il s'agit en effet :

- de légitimer l'emploi par IMACLIM des fonctions de réaction révélées par les modèles technico-économiques : le degré de souplesse révélé est indissociable des caractéristiques de l'équilibre de référence considéré. La cohérence du couplage entre IMACLIM et un modèle *bottom-up* donné repose donc sur la prise en compte dans IMACLIM-PROJTES d'un maximum d'éléments de la projection énergétique, mais aussi de l'harmonisation préalable des hypothèses communes aux deux exercices de projection, au premier rang desquelles les hypothèses de croissance retenues;
- plus fondamentalement, de tester, à l'occasion de ce couplage, la compatibilité des évolutions projetées par le modèle couplé avec les contraintes de l'équilibre général. On peut en effet détecter dans certains cas une incompatibilité entre les projections de croissance générale de l'activité, intrants du modèle technico-économique, l'évolution des données énergétiques que le modèle calcule en

⁵⁰ La possibilité de chocs macroéconomiques considérables sur le court terme n'est donc pas écartée *a priori*. Elle l'est beaucoup plus dès lors qu'on considère une réforme « idéale », où le niveau de contrainte en vigueur à l'horizon considéré est introduit de manière graduelle, selon des intentions politiques assez crédibles pour former les anticipations des acteurs économiques.

équilibre partiel, et la matrice de comptabilité sociale « historique » utilisée par IMACLIM comme point de départ, qui est elle par définition en équilibre général.

Ces deux points d'importance étant soulignés, nous nous concentrerons dans la suite de ce chapitre sur les spécificités de l'évaluation des politiques climatiques à proprement parler, soit de la déformation des TES projetés par statique comparative en cas de mise en place d'une contrainte carbone en volume ou en prix.

II. Statique comparative à l'horizon de projection

II.1. Principe général

IMACLIM détaille trois secteurs de production—énergies fossiles importées, énergies transformées et bien composite⁵¹—, un ménage représentatif, un gouvernement, un secteur de l'investissement et un agent étranger qui produit les importations et achète les exportations nationales.

Les **deux secteurs de production** nationale conjuguent énergie et bien composite, de production nationale ou internationale, avec le capital et le travail pour produire chacun un bien unique.

Le **ménage représentatif** épargne une proportion fixe de son revenu et arbitre entre consommation de bien composite et d'énergie transformée.

La quantité totale de **formation brute de capital fixe** est considérée stable en pourcentage du revenu disponible brut; elle est divisée en un investissement spécifiquement énergétique, et investissement de productivité générale en cohérence avec l'hypothèse d'un effet d'éviction entre les deux formes de capital.

Une spécification Armington (1969) est retenue pour fixer les importations et exportations d'énergie et de bien composite intermédiaires et finaux : la production

⁵¹ Ce niveau d'agrégation est nécessaire pour faciliter une compréhension des mécanismes d'ensemble. Il présente l'inconvénient de masquer les effets intersectoriels (nous y reviendrons au chapitre VII).

nationale, et la production internationale agrégée, sont des substituts imparfaits sur les marchés intérieur et extérieur. Les élasticités utilisées sont le fruit d'un petit travail d'économétrie évoqué en annexe.

Enfin, le niveau relatif (à la production distribuée de bien composite) des **prélèvements obligatoires** est maintenu, dans l'esprit du modèle analytique simplifié étudié au chapitre II, en vue de tester les effets d'un recyclage de rentrées écofiscales potentielles vers une baisse des prélèvements portant sur le travail.

Pour un niveau de taxe donné, le nouvel équilibre est déterminé par la résolution simultanée de 61 équations permettant d'établir les valeurs de 61 variables (cf. annexe IV.1); le cœur de ce système est constitué par les équations décrites ci-dessous.

II.1.1. Prix de production des biens

La formation des coûts de production est fondée sur des consommations de facteurs variant avec les prix relatifs de ces facteurs, et sur une évaluation de la productivité globale normée en référence. Ainsi les prix des deux biens produits nationalement :

$$p_Q = (p_{Qi} \alpha_{QQ} + p_{Ei} \alpha_{EQ} + p_F (1+\tau_{TvaF}) \frac{F_{iQ}}{Q} + p_{LQ} l_Q + p_{Qck} k_Q) \frac{\Theta}{\Phi} + p_Q \pi_Q \quad (1)^{52}$$

$$p_E = (p_{Qi} \alpha_{QE} + p_{Ei} \alpha_{EE} + p_F (1+\tau_{TvaF}) \frac{F_{iE}}{E} + p_{LE} l_E + p_{Qck} k_E) \frac{\Theta}{\Phi} + p_E \pi_E, \quad (2)$$

où l'on retrouve une version étendue du modèle simplifié dont l'analyse a été proposée au chapitre II, soit des prix composés de :

- consommations intermédiaires de bien composite ($p_{Qi} \alpha_{QQ}$, $p_{Qi} \alpha_{QE}$), d'énergie transformée ($p_{Ei} \alpha_{EQ}$, $p_{Ei} \alpha_{EE}$) et d'énergie fossile brute importée ($p_F (1+\tau_{TvaF}) \frac{F_{iQ}}{Q}$, $p_F (1+\tau_{TvaF}) \frac{F_{iE}}{E}$) par le biais d'une matrice de Leontief. p_{Qi} et p_{Ei} sont des prix moyens composés des prix intermédiaires domestiques, formés sur p_Q et p_E , et des prix à l'importation (soumis à la TVA); une éventuelle taxe carbone entre dans la composition de p_{Ei} en fonction de son contenu carbone γ_i (variable avec la taxe). p_F est exogène, fixé à un niveau quelconque qui ne fait que définir l'unité de mesure du bien F. Les coefficients de la matrice de Leontief sont variables—selon des spécifications calquant les résultats d'un modèle

⁵² Tout au long de cet aperçu des équations du modèle nous conserverons les numérotations telles qu'elles figurent à l'annexe, les 61 équations d'IMACLIM étant au cœur de ces travaux. Nous y ferons aussi référence par simple mention de leur numéro sans renvoi systématique.

bottom-up, cf. chap. V et annexe IV.1—à l'exception des consommations unitaires de bien composite : le modèle est principalement conçu pour tester un recyclage dans une baisse des charges sur le travail; sous une telle hypothèse l'évolution du ratio entre prix de l'énergie et prix composite n'est que de second ordre, et le manque de données n'aurait permis que l'application d'une élasticité exogène;

- coûts de main d'œuvre ($p_{LQ} l_Q, p_{LE} l_E$) et de capital ($p_{Qck} k_Q, p_{Qck} k_E$); les coûts du travail comprennent une part de salaire net, dont l'évolution réelle est liée au taux de chômage (cf. *infra*) et une part de charges prélevées *ad valorem*, qui bénéficient le cas échéant du recyclage du produit d'une taxe carbone. Les coûts du capital sont eux-aussi une moyenne pondérée des prix domestique et à l'importation du bien Q (la FBCF se réalise nécessairement en bien composite), augmentés de la TVA. Les intensités en capital et en travail sont variables—toujours selon des spécifications calquées sur les résultats d'un modèle *bottom-up*—à l'exception de l_E : il est assez contestable, d'un simple point de vue technique, d'envisager des substitutions entre énergie et travail dans la production d'énergie⁵³;
- profit, dans une acception assez large, soit regroupant les marges et les impôts à la production, dans une proportion du prix que l'on fixe (ce qui revient notamment à envisager un *statu quo* de l'état de concurrence des marchés);

Enfin, l'ensemble des consommations physiques de facteurs—dans une acception large, soit incluant les consommations de capital fixe, qui bien qu'elles ne soient que des écritures comptables représentent fondamentalement l'usure du capital productif—sont modifiées par :

- un coefficient de rendements décroissants Θ , fixé à 1 dans l'équilibre de référence, et calibré sur une hypothèse simple en fonction de l'éloignement de Q —que l'on retient comme indicateur de l'activité générale—de sa valeur de référence (cf. annexe IV.1);

⁵³ Simplification de peu d'influence sur les résultats du modèle, si l'on considère d'une part le faible poids des coûts du travail dans la formation des coûts de l'énergie (environ 14% en France en 1998, contre 29% dans le secteur composite), et d'autre part le pourcentage de la main d'œuvre totale employé dans ce secteur (0,5%).

- un coefficient de progrès technique Φ , lui aussi à l'unité en référence, représentant l'endogénéisation du changement technique induit par la réforme écofiscale étudiée, selon une spécification détaillée ci-dessous.

II.1.2. Demande des ménages

Les ménages ne consomment pas d'énergie fossile non transformée. La répartition de leur revenu consommé (une part fixe du revenu disponible brut, on considère le maintien du taux d'épargne entre les deux équilibres) se fait donc entre énergie et bien composite. Les termes de l'arbitrage entre les deux biens sont dictés par les conclusions du modèle technico-économique couplé, alternativement

- selon le calibrage d'un système linéaire de dépenses (*Linear Expenditure System*, LES) :

$$Q_c = Q_b + \frac{1-b}{p_{Qck}} (R_{cons} - p_{Ec} E_b - p_{Qck} Q_b) \quad (16)$$

$$E_c = E_b + \frac{b}{p_{Ec}} (R_{cons} - p_{Ec} E_b - p_{Qck} Q_b) \quad (17)$$

où les consommations finales (Q_c , E_c) sont la somme d'un besoin de base (Q_b , E_b) et d'une proportion fixe (b pour E_c , $1-b$ pour Q_c) du revenu résiduel,

- ou selon une spécification libre les reproduisant le plus fidèlement possible, selon l'évolution du prix relatif des deux biens (p_{Ec} comme p_{Ei} comprend la taxation sur le carbone selon son contenu carbone γ_c).

Le chapitre suivant étudie en détail l'implication du choix de l'une ou l'autre modélisation dans le couplage avec la modélisation *bottom-up*.

La fonction d'utilité sous-jacente au LES, dite de Stone-Geary, est connue :

$$u(E, Q) = (E - E_b)^b (Q - Q_b)^{1-b} \quad (IV.1)$$

et peut donc *a priori* fournir des estimations de variation de bien-être, ce qui représente un avantage sur une spécification plus libre. Cet avantage apparent est cependant trompeur : les adaptations techniques induites par la réforme ne peuvent manquer de modifier la fonction d'utilité de référence, dès lors que l'on suppose, comme c'est le cas, qu'elles sont financées par l'épargne, et n'influent donc pas sur le niveau de revenu consommé.

Dans le même ordre d'idée, il est contestable de conserver le même niveau de besoins de base E_b dans l'équilibre de référence et dans l'équilibre dérivé : l'investissement

d'économies d'énergies des ménages Q_{kEc} (cf. *infra*) en suppose de toute évidence la diminution.

C'est pourquoi, dans les résultats de modélisation présentés aux chapitres VI, VII et VIII, l'évolution de la consommation de bien composite des ménages est donnée comme un indicateur par défaut de l'évolution de leur bien-être, avec l'hypothèse sous-jacente que leur consommation d'énergie, malgré sa forte baisse, leur procure une utilité approximativement inchangée grâce aux investissements effectués.

II.1.3. Demandes de facteurs

Comme indiqué plus haut, la majorité des facteurs de production évoluent en fonction de la taxe, selon les informations délivrées par le modèle technico-économique couplé.

En raison de la difficulté d'interprétation des résultats sur les relations de complémentarité ou de substituabilité entre capital et énergie, deux mécanismes distincts sont représentés :

- d'une part, l'évolution des consommations de capital dans les productions nationales, k_Q Q et k_E E (équations 56 et 57) : k_E E évolue comme le capital d'offre énergétique Q_{kE} , selon les indications du modèle *bottom-up* couplé (l'annexe IV.1 donne l'exemple des modalités du couplage avec le modèle POLES); k_Q Q évolue alors comme le volume total de FBCF Q_k —dont la valeur nominale est modélisée comme une part constante du revenu disponible brut R (équation 19)⁵⁴—, corrigé des FBCF d'offre énergétique Q_{kE} et d'économie d'énergie finale Q_{kEc} ⁵⁵.

On remarquera que le signe des variations ultimes de k_Q et k_E est donc loin d'être donné en première analyse, contrairement à ce que l'on obtient dans un cadre de modélisation classique $Y = F(K, L, E, M)$; il dépend de multiples variables (évolutions respectives du revenu disponible R , du prix de la FBCF

⁵⁴ Comme dans le cas des ménages, l'équilibre des marchés financiers demeure donc implicite, en une simplification sur laquelle de futures versions du modèle reviendront peut-être, mais avec le sentiment que le surcroît de complexité nécessaire à une description des circuits de l'argent ne modifierait pas fondamentalement les résultats obtenus jusqu'ici. Ce sentiment est notamment nourri d'observations sur l'évolution des taux d'épargne et d'investissement, et leur relative stabilité sur le long terme. Soulignons malgré tout que le fait de maintenir des ratios nominaux assure la prise en compte d'une diminution de la FBCF en volume en cas d'inflation de p_Q .

⁵⁵ L'attribution de la totalité de Q_{kE} au secteur composite, alors qu'une part de cette FBCF est le fait du secteur E ; constitue une simplification de peu d'ampleur considérant le poids respectif des deux secteurs dans la production distribuée, donc la FBCF.

p_{Qck} , des niveaux de production Q et E) dont les évolutions sont calculées par la résolution de l'équilibre général.

- d'autre par les intensités en énergie (équations 29 et 30), et en travail dans le secteur Q (équation 39), évoluent en fonction du rapport des prix des deux facteurs, selon les conclusions du modèle technico-économique couplé. Comme dans le cas de la demande des ménages, différentes spécifications ont été testées dans un exemple de couplage avec le modèle POLES, et font l'objet du chapitre suivant.

II.1.4. Équilibre emplois-ressources en volume

Les équations (10) et (11)

$$Q + Q_{iM} + Q_{ckM} = Q_i + Q_c + Q_{pub} + Q_k + Q_{exp} \quad (10)$$

$$E + E_{iM} + E_{cM} = E_i + E_c + E_{exp} \quad (11)$$

garantissent l'équilibre des emplois et ressources en volume des deux secteurs de production nationale : la somme de la production et des importations à destination des consommations intermédiaires (Q_{iM} , E_{iM}) et finales (Q_{ckM} , E_{cM}) est égale à la somme des consommations intermédiaires (Q_i , E_i), des consommations des ménages et des administrations (Q_c , E_c et Q_{pub})⁵⁶, des consommations pour la FBCF (Q_k) et des exportations (Q_{exp} , E_{exp}).

Cet équilibre est le pendant de l'équilibre en prix décrit par les équations (1) et (2)— que l'on peut multiplier respectivement par Q et E —, les deux jeux d'équations se complètent donc pour garantir une cohérence en prix en quantités de l'économie représentée.

II.1.5. Neutralité budgétaire et recyclage

Dans le cas de l'évaluation d'une réforme supposant un basculement de fiscalité vers les émissions de carbone, l'équation (46) définit la « neutralité budgétaire » des réformes envisagées en indexant l'évolution de la masse des prélèvements obligatoires

⁵⁶ La majorité des comptabilités nationales que nous avons pu consulter (notamment lors de l'élaboration du chapitre VIII) considèrent que les administrations publiques ne consomment que le produit d'un secteur spécifique, lui-même agrégé au secteur Q ; leurs consommations d'énergie ne sont donc pas distinguées (elles sont agrégées aux consommations intermédiaires d'énergie du secteur Q).

T sur celle de la production distribuée $p_Q Q$. T est défini comme la somme de l'ensemble des prélèvements de l'économie soit comme

$$T = T_{CS} + T_{TvaQ} + T_{TvaE} + T_{TvaF} + T_{TIIP} + t_i \gamma_i E_i + t_c \gamma_c E_c + T_{IR} + T_{IS} + T_{prod} + T_{fix} \quad (44)$$

où sont représentées :

- les cotisations sociales T_{CS} , qui regroupent les cotisations à la charge des employeurs et à la charge des salariés, prélevées *ad valorem* sur la masse salariale nette selon l'équation (52);
- les TVA sur chacun des trois biens, prélevées *ad valorem* sur leurs importations et leurs consommations finales, selon les équations (53), (54) et (55);
- la TIIP, prélevée forfaitairement sur les consommations intermédiaires et finales d'énergie transformée selon leur contenu respectif en carburants (équation 49);
- les taxations du carbone intermédiaire et final sur la base du contenu carbone des consommations, $\gamma_i E_i$ et $\gamma_c E_c$;
- l'impôt sur le revenu T_{IR} , prélevé *ad valorem* sur la somme des rémunérations nettes, des allocations de chômage et de la part de l'excédent brut d'exploitation revenant aux ménages (équation 50);
- l'impôt sur les sociétés T_{IS} , prélevé *ad valorem* sur la part de l'excédent brut d'exploitation revenant aux entreprises (équation 51);
- les impôts à la production, T_{prod} , indexés sur l'évolution de la production distribuée $p_Q Q$ (équation 48);
- un reliquat T_{fix} défini en référence comme la différence entre la somme total des prélèvements obligatoires et les prélèvements explicites ci-dessus, essentiellement composé de taxes d'accises et de prélèvements douaniers—pour la France en 1998 il ne constitue que 2,7% du total des prélèvements (cf. annexe IV.2 tab. A.10). Son évolution est elle-aussi indexée sur celle de la production distribuée de bien Q (équation 47).

Cette désagrégation des prélèvements vaut en fait pour la France, et doit être adaptée selon les économies considérées (taxes à la consommation au lieu de TVA, ampleur des prélèvements sur les carburants ne justifiant pas leur singularisation, *etc.*).

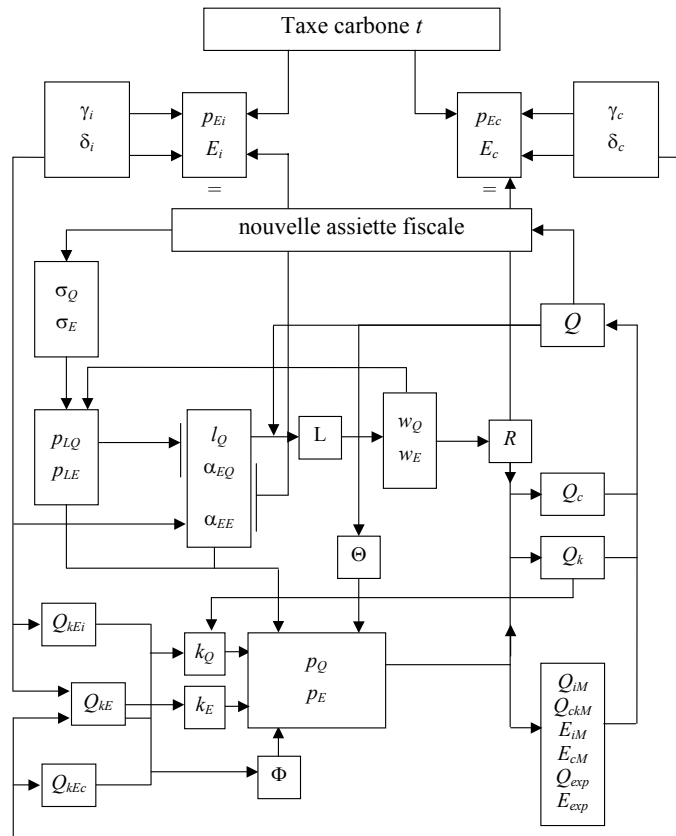
L'exercice de statique comparative central consiste donc à faire varier de manière identique (équation 45) σ_Q et σ_E les prélèvements sur le travail des deux secteurs agrégeant les cotisations patronales et salariales, de manière à équilibrer T selon les nouvelles rentrées de la fiscalité sur le carbone à autres taux et prélèvements forfaitaires constants. De multiples autres possibilités s'offrent au modélisateur, par des modifications très simples du modèle :

- on peut considérer que les prélèvements salariaux sont spécifiquement visés, et contraindre les producteurs à traduire la baisse de fiscalité dans une hausse directe du salaire net; sous cette hypothèse le coût du travail est maintenu et son revenu augmenté, et on peut donc s'attendre d'une part à un effet emploi plus faible et d'autre part à un effet consommation plus positif que ceux présentés au chapitre VI;
- on peut tester l'hypothèse d'une taxation non recyclée, en fixant les prélèvements sur le travail σ et en supprimant l'indexation du niveau des prélèvements T ; sous cette hypothèse la hausse de T pourrait entraîner une hausse des consommations publiques Q_{pub} qui lui sont indexées selon l'équation (18), en supposant du moins qu'elle compenserait un effet inflationniste magnifié par l'absence de recyclage. L'évaluation de l'effet ultime sur le bien-être des ménages supposerait alors la prise en compte de l'utilité qu'ils dérivent des dépenses publiques⁵⁷;
- on peut fixer les σ et relâcher un autre taux de prélèvement ou une taxe forfaitaire pour étudier l'impact d'un recyclage dans une baisse de la TVA, de la TIPP, de l'IR, de l'IS, *etc.* Nos travaux ne présentent pas d'étude comparative des résultats d'hypothèses alternatives de recyclage : considérant la prépondérance des questions de chômage dans la société française, ils sont centrés sur l'évaluation de la plausibilité d'un second dividende en emploi, et n'évaluent donc que le recyclage vers la fiscalité la plus directement distrosive en la matière.

⁵⁷ Prise en compte qui n'est pas absolument nécessaire dans les résultats des chapitres VI et suivants, dans la mesure où les consommations publiques réelles évoluent en définitive peu ou prou comme les prélèvements à prix constants, donc peuvent être considérées comme la source d'une même utilité dans l'équilibre de référence et les équilibres dérivés.

II.2. Mécanique du rééquilibrage

La mécanique générale présidant au nouvel équilibre est décrite fig. IV.2 :



La nomenclature complète du modèle est présentée en annexe p. 203.

Figure IV.2 Mécanique de la taxe recyclée dans IMACLIM

Lorsqu'une taxe carbone t introduite sur l'assiette γ du contenu carbone des consommations d'énergie E_i (intermédiaires) et E_c (des ménages) perturbe l'équilibre initial, le nouvel équilibre est recherché en baissant les charges sur le travail σ_Q et σ_E de façon à respecter la contrainte de neutralité budgétaire.

Ceci détermine de nouveaux coûts relatifs des facteurs p_{LQ} , p_{LE} et p_E , donc de nouveaux coefficients unitaires de consommation intermédiaire d'énergie, α_{EQ} et α_{EE} et de travail l_Q ; les nouveaux prix des biens p_Q et p_E sont alors calculés en tenant compte des substitutions entre facteurs et de l'évolution de la productivité globale,

matérialisée par un progrès technique hicksien Φ et une hypothèse de rendements décroissants Θ .

Par ailleurs, l'évolution de l'intensité en travail l_Q modifie le revenu disponible brut R . La demande en bien composite s'adapte aux nouveaux prix relatifs et au nouveau revenu; elle est d'autant plus faible, à revenu constant, que les dépenses énergétiques s'accroissent.

L'évolution de la production totale de bien Q , approximation du niveau général d'activité, dépend, compte tenu des consommations intermédiaires, non seulement de celle des ménages, mais aussi du solde commercial induit par le nouveau rapport des prix nationaux et internationaux.

II.3. Traits saillants

II.3.1. Refus du paradigme d'une croissance « en âge d'or »

IMACLIM ne présuppose pas un équilibre de premier rang avec croissance « en âge d'or » et perfection des marchés; le respect de telles hypothèses serait en effet contradictoire avec la volonté affichée en introduction à ce chapitre de se donner les moyens de représenter des théories économiques variées, et aussi de prendre en compte ceux des déterminants du deuxième dividende caractéristiques d'une économie de second rang⁵⁸.

Notamment, la modélisation d'un chômage d'équilibre cautionne un effet distorsif des prélèvements sur le travail, ce qui permet à IMACLIM d'intégrer l'un des principaux points de la controverse macroéconomique en matière de double dividende (cf. chap. II). La représentation d'un impact de l'évolution du chômage dans la détermination du salaire nominal modère l'effet de la diminution de ces distorsions : il convient de simuler des hypothèses où, tout au long de la trajectoire dynamique implicite de la fig. IV.1, une partie de la baisse des prélèvements obligatoires sur le travail est

⁵⁸ On peut pourtant qualifier l'exercice d'analyse « en équilibre général », en revenant au sens premier de l'expression, quelque peu malmené par l'hégémonie des paradigmes néoclassiques : les résultats obtenus doivent être compris comme ceux d'un nouveau sentier d'équilibre de long terme, aboutissement du rééquilibrage consécutif aux perturbations introduites.

revendiquée par les salariés sous forme de hausse du salaire réel. La spécification retenue pour représenter cette éventualité (équation 33) est voulue assez souple pour représenter des hypothèses contrastées en la matière, et permet d'éviter une prise de position tranchée dans un débat qui dépasse le cadre de nos travaux.

II.3.2. Endogénéisation du progrès technique induit

L'endogénéisation du progrès technique induit par les réformes considérées est opérée sur des prémisses simples :

- on considère un taux de formation brute de capital fixe constant, ce qui à revenu disponible donné détermine le niveau total de FBCF Q_k ;
- on soustrait à cette FBCF totale les investissements d'offre Q_{KE} et de demande Q_{KEi} (consommations intermédiaires) et Q_{KEc} (consommations des ménages) spécifiquement énergétiques, pour obtenir une FBCF de productivité générale, qui détermine un coefficient de progrès technique hicksien Φ selon un exercice d'économétrie détaillé en annexe IV.1.

L'effet d'éviction ainsi représenté peut être tempéré par le jeu d'une variable de contrôle, le taux τ_{ev} , représentant la mesure des investissements spécifiquement énergétiques sans incidence sur la productivité générale : un taux de 1 signifie un effet d'éviction complet où la perte de productivité, liée à une moindre innovation, est proportionnelle à la baisse de la FBCF non énergétique; une valeur inférieure à 1 suppose qu'une mesure des investissements énergétiques bénéficient au progrès technique général par des externalités positives (phénomène de *spill over*).

II.3.3. Représentation des saturations de l'efficacité dynamique des signaux prix

Nous avons souligné précédemment que l'ordre de grandeur des contraintes carbone justifiées par le niveau d'alerte scientifique climatique implique des coûts marginaux non négligeables. La modélisation de ces contraintes se doit donc de représenter des phénomènes de saturation des réactions aux prix (asymptotes technologiques, butée sur des besoins incompressibles), avec pour conséquence directe le rejet de l'utilisation d'élasticités constantes sur tout l'espace étudié, que ce soit pour les fonctions de demande ou les fonctions de production.

Ce choix impose de renoncer à l'utilisation de formes fonctionnelles courantes (Cobb-Douglas, CES, LES) assurant l'explicitation conjointe, en amont de fonctions de

production et d'utilité, et en aval (*via* le lemme de Shephard ou l'identité Roy) de fonctions de demandes de facteur et de demandes marshalliennes. Soulignons cependant que de telles spécifications ne sont à l'origine que des approximations *ad hoc* des observations réelles, essentiellement utilisées pour des questions de tractabilité analytique qui perdent de leur pertinence dans un cadre calculable.

La procédure suivie—dont le détail technique est présenté au chapitre suivant dans le cas d'un couplage avec le modèle POLES—consiste à interpréter les résultats des modèles énergétiques pour un niveau de taxe donné (ou plus précisément pour une variation de cette taxe à partir de ce niveau) comme des élasticités prix à revenu ou niveau de production constant, puis à révéler au voisinage de cette taxe la seule fonction (de consommation ou de production) compatible avec les contraintes d'équilibre général et les principes macroéconomiques les plus fondamentaux—égalité des coûts et des productivités marginales, loi de Walras. L'approximation est répétée pour chaque niveau de taxe, et, lorsqu'on s'approche des asymptotes de progrès technique que la modélisation technico-économique ne peut manquer de révéler la fonction de production macro-économique prend une allure de fonction Leontief.

En définitive, l'entreprise revient à révéler la fonction enveloppe des fonctions de demande de facteurs ou de biens induites par les signaux-prix; cette fonction débouche sur des élasticités ponctuelles non constantes sur l'espace étudié, plus ou moins optimistes selon le caractère des résultats du modèle énergétique couplé.

Ce choix fort fait écho au premier volet de la controverse technique présentée plus haut; l'articulation sur laquelle il débouche est assez générale pour permettre le couplage d'IMACLIM à tout modèle *bottom-up*, voire l'évaluation de pures hypothèses techniques, explicitées par une asymptote et une vitesse de déplacement vers cette asymptote, comme c'est le cas dans les résultats présentés au chapitre VI.

Conclusion

On peut résumer en cinq points les forces du modèle IMACLIM ainsi constitué : les spécifications retenues dans sa construction lui permettent

- de se prêter au couplage avec les résultats de tout exercice de modélisation technico-économique, des plus optimistes aux plus pessimistes en matière d'efficacité dynamique du signal prix sur la demande d'énergie et les substitutions entre énergies, de coût d'investissement des techniques économes

en carbone, et d'horizon technologique (asymptotes de saturation des substitutions);

- d'intégrer la déformation induite par les écotaxes des fonctions de production hors énergie, en cohérence avec la réponse du secteur énergétique et sur la base de principes microéconomiques fondamentaux;
- d'explicitier les effets d'éviction entre FBCF d'offre et de demande d'énergie, et FBCF directement liée à la productivité générale des facteurs, ainsi que les hypothèses sur les externalités technologiques susceptibles de les atténuer;
- de représenter des équilibres de long terme en sous-emploi, et où l'évolution du salaire net dépend du rapport de force en matière salariale, lui-même fonction du taux de chômage selon une formulation simple se prêtant à la représentation d'hypothèses contrastées;
- de prendre en compte les impacts sur la compétitivité internationale et donc la balance commerciale dans l'hypothèse d'une application unilatérale d'une politique climatique.

Soulignons que le modèle, à l'image sans doute de l'ensemble des exercices de modélisation couramment utilisés, est en perpétuel développement : d'une part, dans le seul cadre d'analyse circonscrit par les chapitres VI, VII et VIII, toute nouvelle utilisation suppose une adaptation de la version de base présentée dans ce chapitre; d'autre part des extensions sont prévues à plus ou moins court terme, et notamment le développement de versions désagrégées par secteurs d'activité et par niveaux de revenu (cf. chap VII), ou la construction d'une version multi-régionale, composée de la simple mise en parallèle de versions du modèle avec bouclage des balances de paiement nominales et réelles au niveau mondial.

Chapitre V

IMACLIM-POLES :

**illustration des enjeux
de l'articulation
*top-down/bottom-up***

Introduction

Ce cinquième chapitre présente les modalités et les conséquences de différentes possibilités de couplage du modèle IMACLIM exposé ci-dessus, et d'un modèle technico-économique POLES.

Son objectif premier est de proposer une illustration des conséquences du choix pour IMACLIM entre l'utilisation de fonctions macroéconomiques usuelles et celle de fonctions libres spécifiquement construites, dans la représentation fidèle des comportements de demande de biens et de facteurs qu'il dérive d'un modèle technico-économique.

Pour ce faire, après avoir brièvement présenté le modèle POLES, on commence par décrire de manière extensive les opérations de calibrage de l'une et l'autre approche concernant l'arbitrage entre facteurs dans la production puis entre biens dans la consommation finale; il propose ensuite un aperçu des divergences observées dans les résultats du modèle selon les combinaisons des spécifications possibles dans la production et la demande.

Un propos annexe, l'illustration de l'intérêt du bouclage macroéconomique des résultats techniques, est abordé en fin de chapitre. Il sera plus amplement développé au chapitre VIII.

I. Le modèle POLES

Le modèle POLES est un modèle de simulation du système énergétique mondial à l'horizon 2030 : les évolutions démographiques et économiques, pour chacun des grands pays ou régions du monde, sont considérées comme exogènes ; en revanche, les évolutions de l'ensemble des variables caractérisant la consommation, la transformation, la production et les prix de l'énergie sont endogènes au modèle (Criqui *et al.* 1996).

Ses principales utilisations relèvent de trois grands types d'exercices :

- prospective détaillée du système énergétique mondial, par grand pays ou région, avec simulation de la demande par secteur, des technologies énergies

nouvelles et renouvelables, des systèmes électriques, de l'offre et des prix des hydrocarbures;

- analyse du progrès technique du secteur de l'énergie soit par simulation de scénarios exogènes de « percée technologique », soit par une endogénéisation des effets cumulatifs d'expérience et d'apprentissage sur les nouvelles technologies;
- simulation des impacts potentiels de la prise en compte des contraintes d'environnement global, exprimées dans les accords internationaux sur la limitation des gaz à effet de serre, avec calcul des coûts marginaux de réduction par pays et par secteur et utilisation du logiciel spécialisé ASPEN (Analyse des Systèmes de Permis d'Emission Négociables) pour la simulation de marchés de droits d'émission, éventuellement régulés (Criqui *et al.* 1999, Blanchard et Criqui 2000);

C'est un modèle de simulation récursive : la dynamique est donnée, à partir du point initial puis d'année en année, par les ajustements progressifs des variables d'offre et de demande d'une part et de prix d'autre part.

L'horizon prospectif a été volontairement limité à une trentaine d'années, dans le souci de conserver dans le modèle des technologies explicites et non génériques : hypothèse est faite que les technologies qui pourront avoir un impact quantitatif significatif en 2030 doivent être au moins identifiées aujourd'hui.

Le modèle est construit selon une structure hiérarchisée de modules interconnectés au niveau national, régional et mondial :

- le plan national intègre les modules de production d'énergies fossiles, de conversion en électricité, d'énergies nouvelles et de consommation par postes (11 postes de consommation, dont 8 secteurs productifs, pour les pays à modèle détaillé);
- les plans régionaux ou mondiaux intègrent les flux d'échanges énergétiques et les modules de prix internationaux, pour les trois grandes énergies faisant l'objet d'un large commerce international, pétrole, gaz naturel et charbon.

Dans sa désagrégation géographique actuelle, le modèle distingue 38 pays ou régions. Par ailleurs, au sein de chaque région, les plus grands pays—ceux du G7 et les cinq grandes économies en développement rapide Chine, Inde, Corée du Sud, Brésil et Mexique—sont identifiés et traités par des modèles détaillés. Cette caractéristique est particulièrement importante pour l'étude des coûts des stratégies de réduction des

émissions de gaz à effet de serre, ainsi que des enjeux associés dans la négociation internationale sur le changement climatique.

Une autre caractéristique du modèle POLES est d'offrir une désagrégation détaillée des secteurs et technologies énergétiques, ce qui permet de rattacher toutes les évaluations des coûts marginaux de réduction à des variables technologiques explicites.

L'évaluation des coûts de réduction est menée à partir de l'introduction d'une taxe carbone fictive—d'une valeur du carbone—dans l'ensemble des modules de consommation-transformation de l'énergie. Cette taxe carbone fictive entraîne des ajustements de la demande d'énergie finale, par des changements technologiques ou de comportements implicites, ainsi que des substitutions dans les systèmes de conversion d'énergie, pour lesquels les technologies sont au contraire explicitées. À partir d'une projection de référence dans laquelle la taxe fictive est considérée comme étant égale à zéro, il est ensuite possible de calculer, par simulations successives, les niveaux d'émission associés à une taxe fictive variant par pas, de 0 à 600 euros par tonne de carbone (€/tC) par exemple. On construit ainsi les courbes de coût marginal de réduction permettant de déduire le coût marginal de réduction associé à un niveau donné d'émissions (Criqui *et al.* 1997).

II. Fonctions usuelles/formes spécifiques : degrés de liberté dans le calibrage

Comme indiqué au chapitre IV, l'articulation entre IMACLIM et la modélisation *bottom-up* concerne :

- le niveau de consommation intermédiaire d'énergie dans la production d'énergie ;
- le choix énergie/travail dans la production de bien composite ;
- le choix énergie/bien composite dans la consommation des ménages.

On présente ci-dessous le détail de chacune de ces trois articulations dans le cas d'un couplage avec POLES, en distinguant pour chacune d'entre elles le choix de fonctions usuelles ou celui de formes spécifiques.

II.1. Production d'énergie transformée E

Dans la production d'énergie transformée, l'absence de toute substitution entre énergie et travail est posée comme une hypothèse et on représente donc les consommations d'énergie comme une fonction du niveau réel des prix de l'énergie selon les indications de POLES. POLES fournit un ensemble de soixante et un vecteurs $(t, \delta_i, \delta_{Ci})$ liant t , une taxe par tonne de carbone émise variant de 0 à 600 € par pas de 10 €, δ_i des baisses de consommation d'énergie dans la production d'énergie et δ_{Ci} des baisses des émissions de carbone de ces consommations. En conséquence, on modélise une baisse d' α_{EE} fonction du prix de l'énergie à partir de couples $\left(\frac{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t}{p_{Q0}}, \alpha_{EE0} (1-\delta_i) \right)$,

avec des notations identiques à celles d'IMACLIM, soit

p_{Ei0} le prix de la consommation d'énergie à des fins intermédiaires, dans l'équilibre de référence (dans les simulations numériques proposées ci-après une projection 2030 pour l'Union européenne, dont la construction est similaire à celle de la France présentée en annexe),

γ_i les émissions de carbone par unité d'énergie intermédiaire consommée,

p_{Q0} le niveau de référence du prix du bien composite, utilisé comme indice des prix, et considéré comme invariant puisque POLES est un modèle d'équilibre partiel,

α_{EE0} la consommation unitaire d'énergie dans la production de bien composite, en référence.

L'ajustement des soixante et un points se fait par l'utilisation d'une forme fonctionnelle de type

$$y = y_0 (a + \arctan(b + c x)), \quad (V.1)$$

en liant la consommation unitaire α_{EE} au ratio des prix de l'énergie p_{Ei} et du bien composite p_Q , en fonction de sa valeur à l'équilibre de référence, soit en posant pour chacun des 61 points donnés par POLES :

$$\alpha_{EE0} (1-\delta_i) \approx \alpha_{EE0} \left(a + \arctan \left(b + c \frac{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t}{p_{Q0}} \right) \right) \quad (V.2)$$

On opère alors une régression sur les coefficients a , b et c par les moindres carrés (non linéaires de toute évidence) sur les 60 pas de taxe, de 10 à 600 euros par tonne (€/tC).

II.2. Production de bien composite Q

Dans le cas de la production composite, la substitution entre les facteurs énergie et travail peut se faire de deux manières :

- utiliser les données POLES pour calibrer les consommations de facteurs d'un système de production macroéconomique usuel donné;
- construire une forme réduite des relations entre vecteur des prix et consommations, en reproduisant le plus fidèlement possible les variations mises en évidence par le modèle technique.

Ainsi, le dilemme porte sur le choix du calibrage de fonctions macroéconomiques usuelles, aux propriétés établies, au comportement maîtrisé, dont les fonctions associées de production ou d'utilité, de part des dépenses sont connues, mais qui exercent une contrainte sur la quantité d'information susceptible d'être importée depuis le modèle technique; ou le choix de consommations de facteurs et de biens intégrant l'ensemble de l'information du modèle technique, mais dérivées de fonctions de production et d'utilité qui demeurent implicites (cf. chap. précédent). Les développements qui suivent examinent les modalités et les implications de chacun des deux termes de l'alternative.

II.2.1. Fonctions usuelles : Constant Elasticity of Substitution

La spécification fonctionnelle la plus largement usitée dans les modèles d'équilibre général calculable pour la description des processus de production est la fonction *Constant Elasticity of Substitution* (CES) : les modèles les plus diffusés d'analyse des coûts macroéconomiques d'une contrainte carbone (G-Cubed, MS-MRT, SGM, EPPA⁵⁹) l'utilisent.

La spécification CES est une généralisation de la fonction Cobb Douglas. Elle implique (comme son nom l'indique) une élasticité de substitution des différents facteurs constante, mais non nécessairement égale à 1. Pour un ensemble de n facteurs x_i elle s'écrit :

⁵⁹ Cf. Mc Kibbin, Wilcoxon (1995), Bernstein *et al.* (1999), Fisher-Vanden *et al.* (1993), Babiker *et al.* (2001).

$$f(x_1, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (\text{V.3})$$

où les α_i sont un jeu de paramètres, et ρ un paramètre supplémentaire, inférieur à 1 dès lors que l'on considère une fonction concave. Une des caractéristiques de la fonction CES ci-dessus est qu'elle est homogène de degré 1. On peut donc récrire l'équation générale pour deux facteurs unitaires de la production de bien composite concernés, α_{EQ} et l_Q :

$$\left(\alpha \alpha_{EQ}^\rho + \beta l_Q^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} = 1 \quad (\text{V.4})$$

La minimisation des coûts de production unitaires donne pour condition de premier ordre

$$l_Q = \alpha_{EQ} \left(\frac{p_{LQ} \alpha}{p_{Ei} \beta} \right)^{\frac{1}{\rho-1}}, \quad (\text{V.5})$$

où p_{Ei} et p_{LQ} sont les prix de l'énergie intermédiaire (facteur de production) et du travail (dans la production de bien Q), et en injectant (V.5) dans (V.4) on obtient les fonctions de demande explicites

$$\alpha_{EQ} = \left(\alpha + \beta \left(\frac{p_{LQ} \alpha}{p_{Ei} \beta} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{V.6})$$

et symétriquement

$$l_Q = \left(\beta + \alpha \left(\frac{p_{Ei} \beta}{p_{LQ} \alpha} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{V.7})$$

Comme dans le cas du secteur énergétique, les données issues de POLES sont un ensemble de soixante et un triplets $(t, \delta_i, \delta_{Ci})$. En outre, POLES, en tant que modèle d'équilibre partiel, raisonne implicitement à coût du travail p_{LQ} constant. Le calibrage sur les données de POLES consiste donc à définir un ensemble de paramètres $(\rho, \alpha, \beta, p_{LQ})$ qui optimisent l'ajustement d'une série de consommations unitaires d'énergie, fonctions du prix de l'énergie selon l'équation (V.6), sur une série de points $(\alpha_{EQ0} (1-\delta_i), p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t)$ tirés de POLES. Dans l'idéal on cherche donc $(\rho, \alpha, \beta, p_{LQ})$, mais aussi α_{EQ0} et p_{Ei0} (les niveaux de référence de la consommation unitaire d'énergie et de son prix), tels que pour chacun des triplets $(t, \delta_i, \delta_{Ci})$

$$\alpha_{EQ0} (1-\delta_i) = \left(\alpha + \beta \left(\frac{p_{LQ} \alpha}{(p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t) \beta} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{V.8})$$

Il semble au prime abord que le nombre de paramètres librement déterminés puisse permettre un ajustement précis sur les données technico-économiques ; il s'avère cependant que le degré de liberté apparent est fortement réduit par les contraintes imposées dans l'équilibre de référence d'IMACLIM. Ainsi les montants des dépenses d'énergie et de travail dans la production de bien composite sont donnés par cette projection (cf. le format des TES tab. A.9, annexe IV.2), si bien que, avec Q le volume de production de bien composite on obtient deux contraintes à l'équilibre de référence

$$p_{Ei0} \alpha_{EQ0} Q_0 = A \quad (V.9)$$

$$p_{LQ} l_{Q0} Q_0 = B \quad (V.10)$$

où A et B sont des valeurs fixées connues.

Les équations (V.4) (V.5) (V.6) (V.7) tenant pour chacune des soixante et une valeurs de t , on peut exprimer l'équation (V.5) au point de référence, y remplacer α_{EQ0} et l_{Q0} selon les équations (V.9) et (V.10) pour obtenir,

$$p_{LQ}^{\frac{\rho}{\rho-1}} = \frac{B}{A} p_{Ei0} \left(\frac{\alpha}{p_{Ei0} \beta} \right)^{\frac{1}{1-\rho}} \quad (V.11)$$

Injectant alors (V.11) dans l'équation (V.8) on obtient

$$\alpha_{EQ0} (1-\delta_i) = \alpha^{\frac{-1}{\rho}} \left(1 + \frac{B}{A} \left(\frac{p_{Ei0}}{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{-1}{\rho}} \quad (V.12)$$

À nouveau, il faut garder à l'esprit que cette équation est vérifiée par définition sur chacun des soixante et un points que l'on cherche à ajuster sur ceux de POLES. En particulier, au point de référence, où $t = \delta_i = \delta_{Ci} = 0$,

$$\alpha_{EQ0} = \alpha^{\frac{-1}{\rho}} \left(1 + \frac{B}{A} \right)^{\frac{-1}{\rho}} \quad (V.13)$$

et en injectant cette définition de α_{EQ0} dans (V.12), on obtient

$$(1-\delta_i) = \left(1 + \frac{B}{A} \left(\frac{p_{Ei0}}{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{-1}{\rho}} \left(1 + \frac{B}{A} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (V.14)$$

Enfin, sachant que γ_i le tonnage d'émissions par unité énergétique consommée dans la production est proportionnel à p_{Ei0} (p_{Ei0} est utilisé pour passer des grandeurs nominales données par la projection de TES aux grandeurs réelles), on peut simplifier la fraction $\frac{p_{Ei0}}{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t}$ en $\frac{1}{1 + (1-\delta_{Ci}) C t}$ où C représente des données macroéconomiques connues.

L'équation (V.14) devient donc

$$(1-\delta_i) = \left(1 + \frac{B}{A} \left(\frac{1}{1 + (1-\delta_{Ci}) C t} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \left(1 + \frac{B}{A} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (V.15)$$

et en définitive il apparaît que l'ajustement se ramène au choix du paramètre ρ , les autres paramètres se déduisant en cascade des équations précédentes, avec deux degrés de liberté (IMACLIM choisit de fixer p_{Ei0} et p_{LQ} , ce qui donne α , β et α_{EQ0} par les équations (V.13), (V.11) et (V.9) par exemple). α , β et ρ étant déterminés, on modélise α_{EQ} et l_Q selon les équations (V.6) et (V.7).

II.2.2. Forme spécifique : souplesse des élasticités variables

Dans le cas du secteur composite, l'utilisation de formes spécifiques est à la fois plus complète et complexe que dans celui du secteur énergie. Comme évoqué plus haut, l'hypothèse centrale d'IMACLIM est en effet que la hausse des prix de l'énergie consécutive à l'introduction d'une contrainte carbone provoque une substitution entre énergie et travail dans la production du bien composite, substitution qui est à la fois due à une modification des processus de production dans les activités de référence, mais aussi à un glissement général de l'activité vers des productions plus intensives en main d'œuvre et moins en énergie. Ces substitutions sont calibrées sur les données de POLES de la manière suivante.

Considérant que POLES raisonne implicitement toutes choses égales en dehors du bien E (et notamment à coût salarial dans le secteur composite, p_{LQ} , invariable), on peut obtenir une fonction donnant la consommation unitaire d'énergie dans la production de bien composite, α_{EQ} , en fonction du rapport des prix des facteurs énergie et travail, à partir de couples $\left(\frac{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t}{p_{LQ}}, \alpha_{EQ0} (1-\delta_i) \right)$, avec des notations identiques à celles utilisées plus haut. Comme dans le cas d' α_{EE} une régression sur une fonction du type de celle présentée équation (V.1) permet d'obtenir des formes spécifiques donnant α_{EQ} en fonction du rapport des prix des facteurs. Il faut encore déterminer quelle variation de la quantité unitaire de travail dans la production l_Q est compatible avec les baisses d' α_{EQ} décrites par POLES. Le simple recours au postulat de la minimisation des coûts de production permet d'y pourvoir de la manière suivante.

On considère qu'une fonction $y = F(\alpha_{EQ}, l_Q)$ enveloppe la fonction implicite du scénario de référence f_0 et celle résultant de la prise en compte des données technico-économiques brutes f_I :

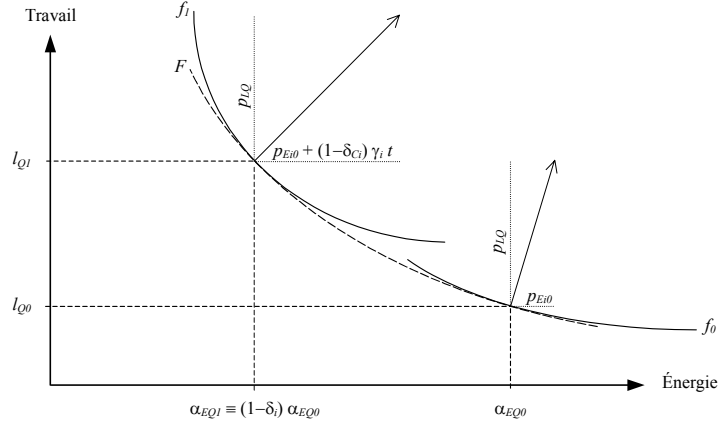


Figure V.1 Enveloppe des isoquantes de production

on a au point de référence (α_{EQ0}, l_{Q0}) les propriétés d'équilibre de minimisation des coûts de production :

$$\frac{\partial F}{\partial l_Q}(\alpha_{EQ0}, l_{Q0}) = p_{LQ} \quad (V.16)$$

et

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_{EQ}}(\alpha_{EQ0}, l_{Q0}) = p_{Ei0} \quad (V.17)$$

soit simplement l'égalité des prix et de la productivité marginale des facteurs. Posons maintenant la différentielle totale de la fonction enveloppe,

$$dy = \frac{\partial F}{\partial l_Q} dl_Q + \frac{\partial F}{\partial \alpha_{EQ}} d\alpha_{EQ} \quad (V.18)$$

pour un taux de taxe faible, on peut appliquer cette approximation linéaire entre l'équilibre initial et le point (α_{EQI}, l_{QI}) (fig. V.1), soit en injectant (V.16) et (V.17) dans (V.18), et considérant que l'on raisonne en données unitaires ($y = 1$), on peut tirer

$$l_{QI} = l_{Q0} + \frac{\frac{\partial F}{\partial \alpha_{EQ}}}{p_{LQ}} \delta_i \alpha_{EQ0} \quad (V.19)$$

on peut ainsi déterminer l_{QI} (on suppose connue la valeur de l'ensemble des variables en référence, soit les variables indicées « 0 »), en utilisant pour approximation de la

dérivée partielle $p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t^{60}$, ce qui permet d'obtenir un second point de F , (α_{EQ1}, l_{Q1}) .

Pour obtenir le point suivant (au sens d'un éloignement de l'équilibre de référence), on applique très exactement le raisonnement précédent en prenant le premier point trouvé comme nouveau point de départ, toutefois la nouvelle évolution de la variable α_{EQ} n'est pas obtenue en appliquant le même δ_i au nouveau point de départ, mais en appliquant au point de référence la baisse de consommation fournie par les sources technico-économiques pour un niveau de taxe de 2 t .

On peut en définitive tirer de couples $\left(\frac{p_{Ei0} + (1-\delta_{Ci}) \gamma_i t}{p_{LQ}}, \frac{\alpha_{EQ0} (1-\delta_i)}{l_{Q1}} \right)$ une approximation de la fonction donnant le rapport des facteurs en fonction de celui des prix dans la production de bien composite. Pour ce faire on utilise à nouveau la forme mathématique de l'équation (V.1), avec des résultats semblables en précision à ceux obtenus pour α_{EE} et α_{EQ} .

II.3. Consommation des ménages

Comme dans le cas de la production de bien composite, et avec les mêmes implications de l'un et l'autre choix, le calibrage de l'arbitrage par les ménages entre consommation de bien composite et d'énergie peut se régler par le recours à des fonctions macroéconomiques usuelles, ou par l'utilisation de formes spécifiques.

II.3.1. Formes usuelles : CES et système linéaire de dépenses

L'ensemble des modèles cités ci-dessus pour leur utilisation, dans la production, de fonctions CES, y font aussi appel pour spécifier la demande des ménages. Est aussi beaucoup utilisé le système linéaire de dépenses (*Linear Expenditure System*, LES), comme dans le modèle GREEN (Burniaux *et al.* 1992).

⁶⁰ Cette approximation entraîne une surestimation des substitutions entre facteurs. Toutefois, après vérification (utilisation de la valeur p_{Ei0} à chaque pas), son impact sur les résultats du modèle est de second ordre.

II.3.1.1. Spécification CES

L'ajustement d'une CES est plus simple que dans le cas de la production : la fonction s'écrit de manière identique, soit avec E_c et Q_c les consommations d'énergie et de bien composite,

$$u(E_c, Q_c) = \left(\gamma E_c^\sigma + \delta Q_c^\sigma \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (\text{V.20})$$

cependant cette fois-ci ce n'est pas l'utilité u que l'on peut supposer constante sur l'ensemble des données de POLES, comme la production unitaire l'était par définition, mais plutôt le revenu consommé R_{cons} ,

$$R_{cons} = p_{Ec} E_c + p_{Qck} Q_c \quad (\text{V.21})$$

où p_{Ec} et p_{Qck} sont les prix à la consommation de l'énergie et du bien composite (en conservant les notations d'IMACLIM, cf. annexe IV.1). Dès lors on ne calcule plus les fonctions de demande explicites par minimisation des dépenses à utilité donnée, mais plutôt par maximisation de l'utilité à dépense donnée. La condition de premier ordre est bien sûr similaire,

$$Q_c = E_c \left(\frac{p_{Qck} \gamma}{p_{Ec} \delta} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}, \quad (\text{V.22})$$

et en injectant (V.22) dans (V.21) on obtient la fonction de demande explicite

$$E_c = \frac{R_{cons}}{p_{Ec} + p_{Qck} \left(\frac{p_{Qck} \gamma}{p_{Ec} \delta} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}} \quad (\text{V.23})$$

Comme pour la production POLES fournit pour la consommation finale des triplets $(t, \delta_f, \delta_{Cf})$ de taxe, baisse des consommations finales E_c et de leur contenu carbone moyen γ_f , le calibrage se fait par l'ajustement d'une série de consommations d'énergie, fonctions du prix de l'énergie selon l'équation (V.23), sur la série de points $(E_{c0} (1-\delta_f), p_{Ec0} + (1-\delta_{Cf}) \gamma_f t)$. R_{cons} étant donné par le TES, et POLES étant supposé raisonner à prix final du bien composite p_{Qck} constant, on cherche simplement $(\sigma, \gamma, \delta, p_{Qck})$, ainsi que E_{c0} et p_{Ec0} tels que pour chacun des triplets $(t, \delta_f, \delta_{Cf})$

$$E_{c0} (1-\delta_f) = \frac{R_{cons}}{p_{Ec0} + (1-\delta_{Cf}) \gamma_f t + p_{Qck} \left(\frac{p_{Qck} \gamma}{(p_{Ec0} + (1-\delta_{Cf}) \gamma_f t) \delta} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}} \quad (\text{V.24})$$

Toujours suivant le cas de la production, les contraintes

$$p_{Ec0} E_{c0} = D \quad (V.25)$$

et

$$p_{Qck0} Q_{c0} = F, \quad (V.26)$$

D et F connus, permettent par (V.22) exprimé en référence d'obtenir

$$p_{Qck} \frac{\sigma}{\sigma-1} = \frac{F}{D} p_{Ec0} \left(\frac{\gamma}{p_{Ec0} \delta} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (V.27)$$

qui injecté dans (V.24) donne

$$E_{c0} (1-\delta_f) = \frac{R_{cons}}{p_{Ec0} + (1-\delta_{Cf}) \gamma_f t + \frac{F}{D} p_{Ec0} \left(\frac{p_{Ec0}}{p_{Ec0} + (1-\delta_{Cf}) \gamma_f t} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}} \quad (V.28)$$

Au point de référence l'équation (V.28) donne une expression d' E_{c0}

$$E_{c0} = \frac{R_{cons}}{\frac{F}{p_{Ec0} + \frac{F}{D} p_{Ec0}}} \quad (V.29)$$

En injectant (V.29) dans (V.28) et en utilisant le fait que γ_f est le produit de p_{Ec0} et de grandeurs nominales ainsi que de volumes d'émission de carbones donnés, soit en posant $G \equiv \frac{\gamma_f}{p_{Ec0}}$, G étant une constante connue, on obtient

$$(1-\delta_f) = \frac{1 + \frac{F}{D}}{1 + (1-\delta_{Cf}) G t + \frac{F}{D} \left(\frac{1}{1 + (1-\delta_{Cf}) G t} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}} \quad (V.30)$$

Il apparaît en définitive que, comme dans le cas de la production, l'ajustement se fait sur le seul paramètre σ , les valeurs des autres paramètres étant soit libres, soit déterminées par les équations précédentes.

II.3.1.2. Spécification LES

Le système linéaire de dépenses est caractérisé par une répartition du budget constante au-delà de la satisfaction de besoins de base. Soit x un panier de n consommations x_i , l'utilité que sa consommation procure est définie comme

$$u(x) = \prod_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^{\beta_i} \quad (V.31)$$

où les \bar{x}_i sont des besoins fondamentaux, et les β_i des paramètres, que l'on maintiendra entre 0 et 1 pour obtenir des utilités marginales positives et décroissantes pour chacun des biens. Pour les deux biens de consommation finale d'IMACLIM on peut récrire cette forme générique comme

$$u(E_c, Q_c) = (E_c - E_b)^{\beta_E} (Q_c - Q_b)^{\beta_Q} \quad (\text{V.32})$$

avec E_b et Q_b les besoins fondamentaux (la base) des consommations de biens E et Q . La maximisation de cette fonction sous contrainte d'épuisement du revenu $R_{cons} = p_{Ec} E_c + p_{Qck} Q_c$ permet de poser la fonction de demande explicite

$$E_c = E_b + \frac{\beta_E}{\beta_E + \beta_Q} \frac{1}{p_{Ec}} (R_{cons} - p_{Ec} E_b - p_{Qck} Q_b) \quad (\text{V.33})$$

soit en définissant $\beta_C \equiv \frac{\beta_E}{\beta_E + \beta_Q}$

$$E_c = (1 - \beta_C) E_b + \beta_C (R_{cons} - p_{Qck} Q_b) \frac{1}{p_{Ec}} \quad (\text{V.34})$$

Les paramètres de l'ajustement sont cette fois β_C , E_b , Q_b , p_{Qck} , E_{c0} et p_{Ec0} tels que pour chacun des triplets $(t, \delta_f, \delta_{Cf})$

$$E_{c0} (1 - \delta_f) \approx (1 - \beta_C) E_b + \beta_C (R_{cons} - p_{Qck} Q_b) \frac{1}{p_{Ec0} + (1 - \delta_{Cf}) \gamma_f t} \quad (\text{V.35})$$

Encore une fois le nombre de paramètres susceptibles d'affiner l'ajustement est trompeur. Tirant E_{c0} de (V.25) on peut l'injecter dans (V.35) pour obtenir

$$(1 - \delta_f) = (1 - \beta_C) E_b + \beta_C (R_{cons} - p_{Qck} Q_b) \frac{1}{p_{Ec0} + (1 - \delta_{Cf}) \gamma_f t} \quad (\text{V.36})$$

qui exprimé à l'équilibre de référence, où le triplet de POLES est nul, permet de définir E_b

$$E_b = \frac{D - \beta_C (R_{cons} - p_{Qck} Q_b)}{p_{Ec0} (1 - \beta_C)} \quad (\text{II.37})$$

En remplaçant E_b ainsi défini dans (V.36), et en utilisant à nouveau $G \equiv \frac{\gamma_f}{p_{Ec0}}$, on obtient en définitive

$$D (1 - \delta_f) = D + \beta_C (R_{cons} - p_{Qck} Q_b) \left(\frac{1}{1 + (1 - \delta_{Cf}) G t} - 1 \right) \quad (\text{II.39})$$

D'où il ressort que l'ajustement se fait par les variations d'un facteur $\beta_C (R_{cons} - p_{Qck} Q_b)$. Une fois ce facteur optimisé, on peut fixer sans aucune contrainte deux des trois paramètres le constituant pour obtenir le troisième.

II.3.2. Forme spécifique

La condition de saturation de la contrainte budgétaire (loi de Walras) permet une modélisation en formes spécifiques plus simple que dans le cas de la production de bien composite. On peut en effet définir à l'aide des triplets de POLES l'évolution du rapport des consommations en fonction du ratio des prix⁶¹, définir l'une des consommations intermédiaires par ce biais et l'autre par saturation de la contrainte budgétaire. Reprenant les notations introduites ci-dessus on fait à nouveau appel à une forme spécifique du type de celle de l'équation (V.1) et on cherche les coefficients minimisant la somme des carrés des résidus tels que sur les soixante et un points définis par POLES

$$\frac{E_c}{Q_c} \approx \frac{E_{c0}}{Q_{c0}} \left(a + \arctan \left(b + c \frac{p_{Ec}}{p_{Qck}} \right) \right) \quad (V.39)$$

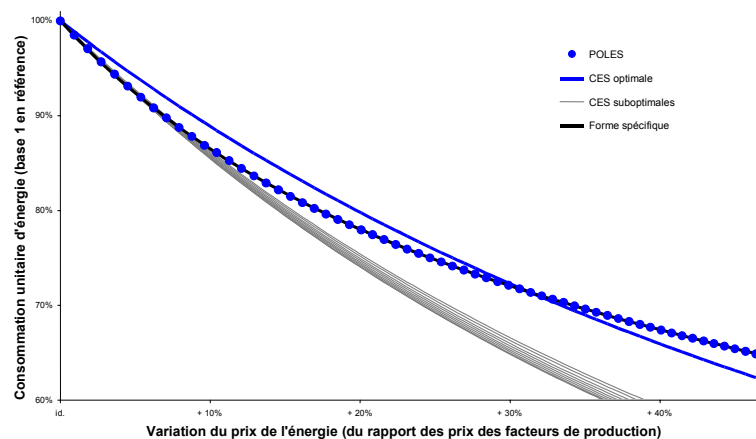
Posant p_{Ec0} et p_{Qck0} , et connaissant R_{cons} , en chacun de ces points E_c est défini par δ_f , p_{Ec} par δ_{Cf} , γ_f et t , p_{Qck} est supposé constant et Q_c est tiré de R_{cons} , E_c , p_{Ec} et p_{Qck} par la loi de Walras (équation (V.21)). On peut dès lors procéder à la régression pour obtenir les trois coefficients a , b et c .

III. Qualités respectives des ajustements

Les implications de ces résultats analytiques sont illustrées dans le cas de l'Union Européenne : l'une et l'autre méthode d'ajustement sont utilisées pour reproduire les données POLES de réduction et de décarbonisation de la consommation d'énergie dans la production de bien composite (graph. V.1)⁶².

⁶¹ On peut montrer, précisément grâce à la loi de Walras, qu'il est strictement équivalent de raisonner sur la part du revenu dédiée à la consommation d'énergie, fonction du ratio des prix.

⁶² L'ajustement obtenu dans le cas de la production énergétique n'a pas été illustré par un graphe. À l'instar de celui de la production de bien composite, il présente une moyenne des valeurs absolues des résidus relatifs de 0,03%, et son tracé épouse l'ensemble des points de POLES qu'il cherche à reproduire, de manière semblable à ce que montre le graphique V.1. À titre de comparaison, la CES optimale de la production de bien composite offre une moyenne des valeurs absolues des résidus relatifs de 1,89%. On aurait pu aussi reproduire les isoquantes en travail et énergie, mais l'isoquante « POLES » aurait nécessité un surcroît d'explications—utilisation des l_Q obtenus par minimisation des coûts de production pour l'isoquante POLES—pour un résultat graphique très semblable.



Graphique V.1 Consommation d'énergie dans la production composite - Union Européenne

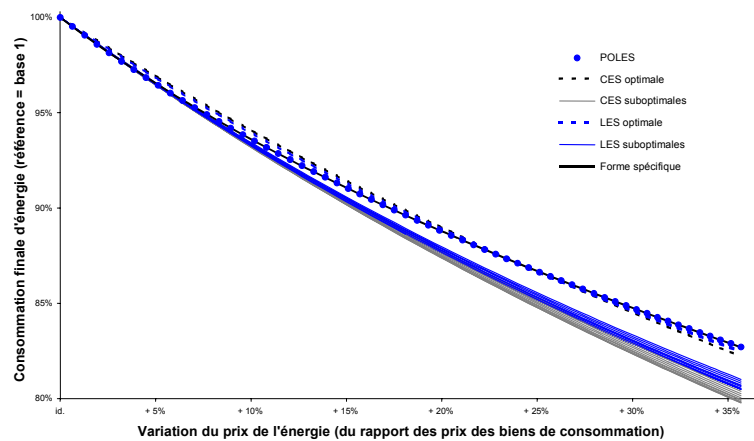
Manifestement, et conformément à notre intuition première, renforcée par les conclusions analytiques ci-dessus, la précision obtenue par utilisation d'une forme spécifique est supérieure à celle qu'offre une spécification CES optimale. Cette CES optimale est atteinte pour une valeur de ρ proche de 0,233, ce qui donne une élasticité de substitution énergie/travail forte, de l'ordre de 130% (pour comparaison les valeurs communiquées par les modèles macroéconomiques d'évaluation des politiques climatiques sont en général inférieures à 100%⁶³). Il est à noter que des ajustements partiels, sur des données plus proches de l'équilibre de référence—taxe de 10 à 60 € par exemple, ou de façon encore plus marquée le calage sur deux points, la référence et un point qui en est peu éloigné, à taxe faible—produisent des ρ donc des élasticités de substitution encore plus élevés : l'ajustement sur les dix premiers points de POLES (taxes de 10 à 100 €) donne des ρ variant de 0,424 à 0,386, soit des élasticités de substitution de 174 à 163%. Inévitablement, pour de tels ajustements les résultats obtenus s'écartent de plus en plus de ceux de POLES quand on augmente le niveau de taxe carbone (graph. V.1).

Le graphique V.2 propose l'équivalent du graphique V.1 concernant la consommation des ménages. La forme spécifique, avec un résidu moyen de 0,01%, donne à nouveau

⁶³ Voir par exemple les valeurs données dans Mc Kibbin, Wilcoxon (op. cit.), Babiker *et al.* (2001) ou Burniaux, Truong (2002). Une comparaison valeur pour valeur n'est pas possible dans la mesure où les imbrications de CES ne suivent pas les mêmes logiques dans les différents modèles, ou encore pour certains modèles parce que les valeurs de l'élasticité de substitution varient selon les secteurs.

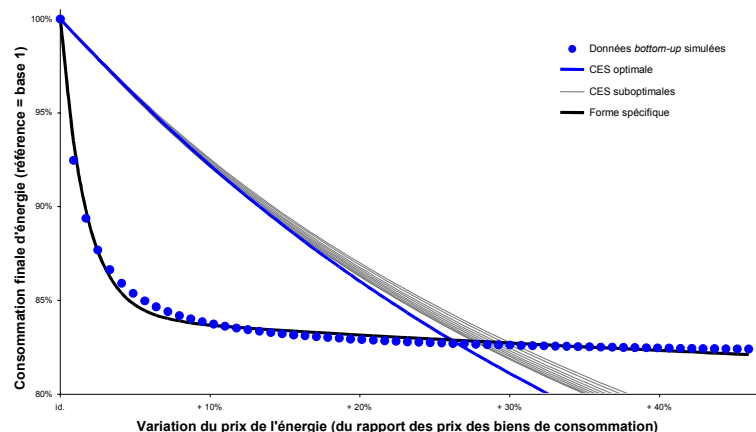
de meilleurs résultats que la fonction CES (résidu moyen de 0,31%). La spécification LES s'intercale entre les deux (0,20%), et de même son calibrage sur l'un des dix premiers points de POLES (courbes bleues) s'écarte moins des données POLES et de la forme spécifique que celui de CES (courbes grises).

Le σ de la CES optimale s'élève à -0,599, ce qui donne une élasticité de substitution de 63% entre énergie et bien composite. Les σ calculés sur les dix premiers pas de taxe par l'équation (V.30) varient entre -0,371 et -0,421 pour des élasticités de substitution de 73% à 70%.



Graphique V.2 Consommation d'énergie des ménages - Union Européenne

Il est à noter que la qualité des ajustements paraît favorisée par le fait que les données POLES sont plus « linéaires » que dans le cas de la production. Cette observation nous a menés à effectuer des ajustements sur des données beaucoup plus convexes, avec des résultats qui méritent illustration :



Graphique V.3 Consommation d'énergie des ménages - forte convexité

De toute évidence, le recours à des formes fonctionnelles classiques ne convient pas à la reproduction de telles données—la moyenne des résidus s'élève pour l'exemple présenté à près de 15%—et le recours à des formes spécifiques, quitte à adapter le modèle utilisé dans ces travaux, semble s'imposer. Il pourrait sembler oiseux de présenter de tels résultats, mais il faut garder à l'esprit que de nombreux modèles *bottom-up* proposent des courbes qui mises à l'échelle du graphique V.3 présentent un profil fortement convexe similaire à celui simulé, sinon plus marqué⁶⁴. La convexité moins accentuée des courbes de POLES est notamment due au fait que seule l'offre d'énergie y est véritablement *bottom-up*, tandis que la demande y reste économétriquement paramétrée (cf. *supra*).

IV. Conséquences sur l'évaluation de politiques climatiques

Les différentes possibilités d'articulation présentées ci-dessus sont intégrées au modèle IMACLIM calibré sur l'Union européenne en 2030, pour fournir des évaluations d'impacts macroéconomiques de niveaux croissants de signaux-prix. Considérant le propos central de l'articulation IMACLIM-POLES—l'évaluation de politiques

⁶⁴ Cf. http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/climate_change/sectoral_objectives.htm pour de nombreux exemples de courbes synthétisant les derniers résultats disponibles en Europe.

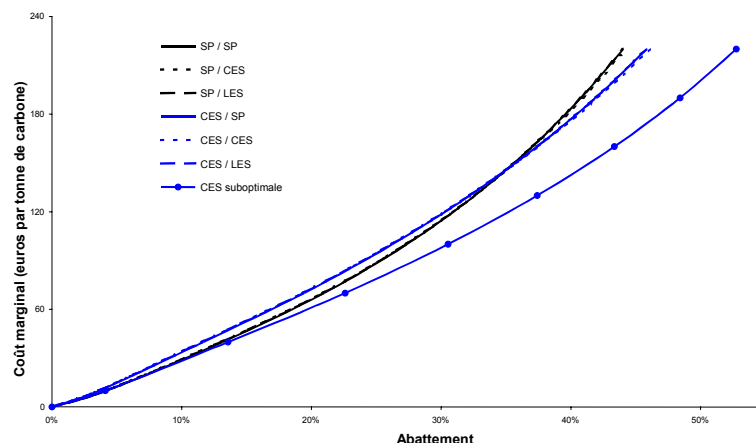
climatiques—, on fait le choix d'illustrer les résultats obtenus par les courbes de coût marginal d'abattement (CCMA) qui en découlent. L'analyse de ces courbes est menée dans deux directions complémentaires :

- une étude de la répercussion des divergences observées entre les ajustements par formes spécifiques et par fonctions usuelles : les spécifications possibles dans la production et la consommation sont croisées et les CCMA dérivées sont comparées;
- une appréciation de l'impact du passage d'un équilibre partiel à un équilibre général : POLES délivre par lui-même une courbe de coûts d'abattement, sectorielle au sens où les variations du système énergétique (prix, volumes) ne sont pas répercutées sur l'ensemble de l'économie; en comparant cette courbe avec celle produite par IMACLIM on obtient une évaluation de l'impact des mécanismes d'équilibre général sur les résultats sectoriels.

IV.1. Portée du choix forme spécifique/fonction usuelle

Le graphique V.4 permet de mesurer l'impact des approximations mises en évidence par les graphiques V.1 à V.3. Il présente les courbes de coûts marginaux d'abattement *ex post* obtenues pour l'Union européenne en 2030 selon la spécification utilisée dans la production et dans la consommation (respectivement à gauche et à droite dans les intitulés de chaque courbe), formes spécifiques (SP), CES ou LES.

Il apparaît tout d'abord que le calibrage « suboptimal » tel que décrit ci-dessus modifie sensiblement les courbes de coût obtenues, dans le sens d'un certain optimisme ; la courbe représentée est celle obtenue dans le cas extrême d'une élasticité de substitution de 174% (cf. *supra*).



Graphique V.4 Coûts marginaux d'abattement 2030 en équilibre général - Union européenne

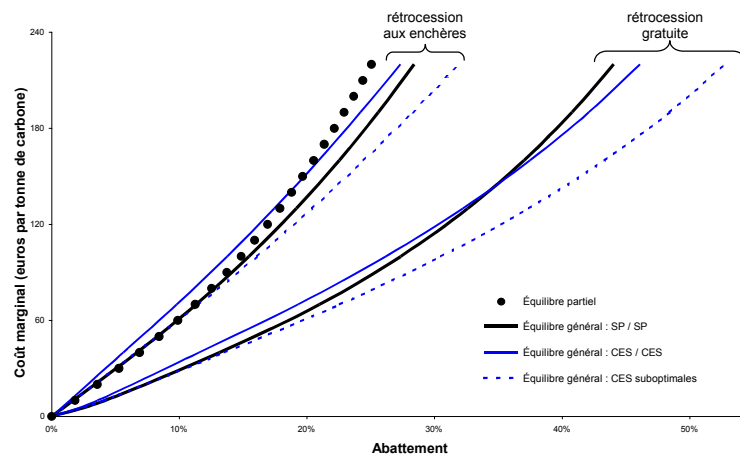
Cependant, en cas de calibrage « optimal », le choix entre forme fonctionnelle et forme spécifique ne semble pas influencer de manière significative les conclusions obtenues en matière de courbe de coût marginal : les divergences illustrées par les graphiques V.1 et V.2 s'estompent dans l'un et l'autre cas, si bien que, dans le cas de la consommation des ménages, le changement de spécification n'a qu'un impact quasi indistinct⁶⁵. Toutefois, concernant la production, la relative rigidité des fonctions usuelles demeure perceptible : le groupe de courbes bleues, pour lesquelles la production est définie par une CES, présente une convexité manifestement plus faible que celui des courbes noires, dont les consommations de facteur sont modélisés par recours à une forme spécifique. Le *caveat* illustré par le graphique V.3 semble donc s'appliquer, et le fait que POLES ne représente les demandes intermédiaire et finale d'énergie que par économétrie, sans expliciter les substitutions techniques sous-jacentes, limite fortement la portée de notre démonstration ; de futurs travaux de couplage d'IMACLIM avec d'autres modèles *bottom-up* permettront sans aucun doute de la renforcer considérablement.

⁶⁵ Pour deux raisons principales : d'une part la spécification n'influe que sur le partage du revenu, et non sur son niveau d'équilibre; d'autre part la hausse du prix de l'énergie entraîne par les consommations intermédiaires une hausse du prix du bien composite, et donc l'évolution du rapport des prix des deux biens, moteur de leur substitution, est freinée.

IV.2. Comparaison des résultats en équilibre partiel et général

Nous avons vu (et proposé une explication de cette constatation) que dans le cas particulier de l'Europe la spécification utilisée pour l'arbitrage des ménages entre les deux biens de consommation n'influe que très marginalement sur le profil des CCMA ; en conséquence, les comparaisons entre résultats en équilibre partiel et général opposent la CCMA directement fournie par POLES à celles des cas centraux SP/SP et CES/CES (optimales et suboptimales). Toutefois chacun des résultats en équilibre général est doublé. Il faut en effet rappeler que la démarche de POLES suppose la mise en place d'une taxe (approche par les prix) ou d'un quota avec marché de droits d'émissions (approche duale par les quantités) ; dans un modèle d'équilibre général, les modalités de la mise en place de cette réforme implicite jouent un rôle primordial : l'affectation des recettes de la taxe ou le mode de rétrocession du quota de permis d'émission et l'affectation de ses éventuelles recettes, modifient—quantitativement voire qualitativement—les conséquences de l'instauration d'une même politique (cf. chapitre VII). Deux jeux de CCMA sont donc construits à partir des résultats du modèle ; dans le cas de l'instauration d'un quota, l'un correspond au profil de coût marginal en cas de rétrocession gratuite du quota instauré, l'autre à celui dérivé de sa mise aux enchères avec recyclage du revenu des enchères dans une diminution de la fiscalité du travail⁶⁶ (graph. V.5).

⁶⁶ Les équivalents de politique par les prix sont respectivement une taxe dont le revenu est recyclé de manière forfaitaire vers les émetteurs ou affecté à une diminution de la fiscalité sur le travail.



Graphique V.5 Coûts marginaux d'abattement 2030 en équilibre partiel et général - Union Européenne

Il apparaît d'une part qu'en cas de rétrocession gratuite, les estimations de coûts marginaux en équilibre général sont significativement plus faibles que celles en équilibre partiel. Ce résultat s'explique par deux mécanismes :

- l'introduction d'une contrainte carbone entraîne une réduction générale de l'activité, qui amplifie les baisses d'émission de carbone constatées dans une approche sectorielle. En comparaison d'IMACLIM, POLES intègre les variations du secteur énergie mais pas celles du secteur composite, dont le poids dans les consommations d'énergie est très largement prépondérant;
- à coût marginal du carbone donné la hausse du prix de l'énergie est beaucoup plus forte dans IMACLIM que dans POLES, dans la mesure où IMACLIM effectue un bouclage sur l'ensemble des coûts de production—une hausse du prix de l'énergie provoque une hausse du prix du bien composite, qui amplifie la hausse du prix de l'énergie, *etc.*—, alors que POLES raisonne à prix de production constant et ne prend donc pas en compte ces effets de propagation. En conséquence un même signal-prix provoque une réduction des émissions plus grande selon IMACLIM que selon POLES.

Le second de ces mécanismes prime fortement sur le premier : dans le cas d'un coût marginal de 100 €, par exemple, IMACLIM calcule une baisse générale de l'activité de 0,7%⁶⁷, qui n'explique qu'une maigre part des 27,3% de baisse totale des émissions.

⁶⁷ Baisse de la production réelle de bien composite.

L'effet de bouclage des prix est donc prépondérant. En résolvant un système simplifié de prix de production d'IMACLIM

$$p_Q = p_Q \alpha_{QQ} + (p_E + t) \alpha_{EQ} + p_F (1 + \tau_{TvaF}) \frac{F_{iQ}}{Q} + p_{LQ} l_Q + p_Q k_Q + p_Q \pi_Q \quad (V.40)$$

$$p_E = p_Q \alpha_{QE} + (p_E + t) \alpha_{EE} + p_F (1 + \tau_{TvaF}) \frac{F_{iE}}{Q} + p_{LE} l_E + p_Q k_E + p_E \pi_E \quad (V.41)$$

en p_E et p_Q on obtient en effet

$$p_E = A + \frac{(\alpha_{EE} + \pi_E) (1 - \alpha_{QQ} - k_Q - \pi_Q) + \alpha_{EQ} (\alpha_{QE} + k_E)}{(1 - \alpha_{EE} - \pi_E) (1 - \alpha_{QQ} - k_Q - \pi_Q) + \alpha_{EQ} (-\alpha_{QE} - k_E)} t \quad (V.42)$$

où A ne dépend pas de t . Ceci permet d'estimer l'importance de l'effet de bouclage : dans l'équilibre de référence européen le coefficient devant t vaut environ 0,4, au premier ordre la hausse du prix de consommation de l'énergie est donc supérieure de 40% à celle qu'indique le signal prix exogène. Tous effets compris, le tableau V.1 révèle des hausses du prix intermédiaire de l'énergie qui, entre POLES et IMACLIM, peuvent varier du simple à près du triple selon les niveaux de contrainte :

Coût marginal	Hausse « POLES » ⁶⁸	Hausse IMACLIM-G ⁶⁹
10 €	+ 0,9%	+ 1,8%
40 €	+ 3,6%	+ 7,5%
70 €	+ 6,2%	+ 13,7%
100 €	+ 8,8%	+ 20,4%
130 €	+ 11,3%	+ 27,5%
160 €	+ 13,7%	+ 34,8%
190 €	+ 16,1%	+ 42,3%
220 €	+ 18,5%	+ 49,7%

Tableau V.1 Effet du bouclage macroéconomique sur la hausse des prix de l'énergie - rétrocession gratuite

⁶⁸ Ou plus exactement hausse telle qu'elle aurait été prise en compte par POLES pour le prix international d'équilibre calculé par IMACLIM, évaluée dans IMACLIM en appliquant le signal-prix au prix intermédiaire de l'énergie de référence, sans bouclage sur les autres prix (du bien composite, de l'investissement, *etc.*).

⁶⁹ Avec formes spécifiques. Les autres configurations donnent des résultats très similaires.

D'autre part, la mise aux enchères des quotas et l'utilisation des marges de manœuvre fiscales qui en résultent impliquent un coût marginal supérieur à contrainte donnée. On pouvait s'attendre à ce résultat, puisque l'influence des deux mécanismes présentés ci-dessus est moindre, voire inversée :

- la baisse d'activité provoquée est dans le pire des cas fortement minorée, et pour certains niveaux de contrainte transformée en un gain net;
- la hausse générale des prix entraînée par le bouclage macroéconomique est limitée par le recyclage des revenus de la mise aux enchères des quotas.

Le tableau V.2 illustre à la manière du tableau V.1 comment le second élément, dont on a montré qu'il est déterminant, évolue en comparaison d'une rétrocession gratuite.

Coût marginal	Hausse « POLES » ⁷⁰	Hausse IMACLIM-E ⁷¹
10 €	+ 0,9%	+ 0,7%
40 €	+ 3,6%	+ 3,1%
70 €	+ 6,2%	+ 5,6%
100 €	+ 8,8%	+ 8,3%
130 €	+ 11,3%	+ 11,1%
160 €	+ 13,7%	+ 14,2%
190 €	+ 16,1%	+ 17,3%
220 €	+ 18,5%	+ 20,7%

Tableau V.2 Effet du bouclage macroéconomique sur la hausse des prix de l'énergie - rétrocession aux enchères

De fait, jusqu'à des niveaux de contrainte relativement élevés le recyclage permet d'inverser l'effet du bouclage macroéconomique sur les prix, en atténuant la hausse nette du coût de l'énergie. Autre résultat significatif, pour chacun des huit niveaux de contrainte testés la hausse de prix constatée est environ 2,5 fois inférieure à celle observée dans le cas d'une rétrocession gratuite. On tient manifestement là une

⁷⁰ Cf. note du tableau V.1.

⁷¹ Cf. note du tableau V.1.

explication majeure du décalage observé entre les deux groupes de courbes (graph. V.5).

La comparaison des courbes avec recyclage et de la courbe en équilibre partiel est moins tranchée. Le tracé de la courbe correspondant à la spécification SP/SP, la plus fidèle aux résultats de POLES, laisse à penser que les coûts marginaux calculés en équilibre général en cas de mise aux enchères des quotas restent plus faibles que ceux en équilibre sectoriel. Le tableau V.2 démontre que les causes du surcroît d'abattement obtenu à coût marginal faible sont à chercher ailleurs que dans le simple bouclage macroéconomique sur les prix de l'énergie. Les résultats détaillés du modèle livrent la clé de ce résultat : l'évolution des prix de l'énergie s'accompagne aussi, grâce au recyclage des revenus de la mise aux enchères, d'une évolution contraire des prix des biens qui lui sont substituables dans la production et la consommation, travail et bien composite ; la hausse relative du coût de l'énergie est en conséquence légèrement supérieure dans le cas du recyclage, et l'on obtient bien des réductions d'émissions plus fortes à coût marginal égal.

Incidemment, on remarque que l'utilisation de formes usuelles optimisées modifie qualitativement la comparaison entre les CCMA en équilibre partiel et en équilibre général avec recyclage, l'équilibre général devenant plus pessimiste pour des niveaux de contrainte inférieurs à environ 18%.

Conclusion

Il est ainsi démontré, dans un cadre analytique très général, que les degrés de liberté qui s'offrent au modélisateur dans le calibrage de fonctions de production ou d'utilité usuelles sont limités. On pouvait intuitivement s'attendre à un tel résultat : les deux spécifications testées, fonctions CES et LES, se ramènent, pour l'une, à la valeur constante de l'élasticité de substitution qu'elle suppose entre ses deux facteurs; pour l'autre, à la part constante de budget allouée à chacun des deux biens au-delà de la satisfaction des besoins de première nécessité. Les coefficients de chacune des consommations dans l'une comme l'autre spécification sont en fait imposés, en amont du calibrage sur les réactivités mises en lumière par l'analyse technico-économique, par leur poids respectif dans la structure de coût ou le budget de consommation.

En conséquence de cette relative absence de souplesse, les formes fonctionnelles usuelles apparaissent inégalement appropriées à la reproduction de résultats technico-économiques : dans l'hypothèse d'un profil de réaction relativement linéaire sur l'intervalle de taxation considéré elles fournissent une bonne approximation des réactivités calculées en *bottom-up*; en revanche, dès lors que la courbure de la réactivité est plus marquée elles s'en écartent au point de pouvoir paraître disqualifiées.

Cette conclusion vient en fait étayer les raisonnements théoriques présentés en clôture du chapitre IV : le caractère relativement linéaire des réactivités mises en lumière par les conclusions bottom-up s'estompe dès lors que l'intervalle de signaux prix testés est assez étendu pour faire apparaître une saturation de leur efficacité dynamique; IMACLIM, qui veut pouvoir tester les contraintes élevées qu'impose l'ampleur des réductions d'émission requises, doit donc bien rejeter l'utilisation de formes fonctionnelles classiques pour avoir recours à des formes spécifiques telles que celles présentées ci-dessus.

Enfin, en clôture de ce chapitre on a illustré la nécessité du bouclage en équilibre général des résultats obtenus par les modèles technico-économiques : la prise en compte des effets d'équilibre général modifie substantiellement les estimations de coût marginal obtenues en équilibre partiel. Notamment, les latitudes qu'offrent les modalités précises d'instauration d'une contrainte donnée, qui dans une grande mesure échappent par nature au cadre d'analyse sectoriel, sont susceptibles de modifier radicalement les estimations de coûts marginaux : le graphique V.5 indique qu'à contrainte donnée les coûts d'un même quota sont multipliés par deux dès lors que le quota est rétrocédé gratuitement aux émetteurs plutôt que mis aux enchères. Ces conclusions préliminaires seront étoffés dans le cadre du chapitre VIII.

Les trois derniers chapitres de ce document présentent et commentent en effet trois applications distinctes de l'outil IMACLIM détaillé aux deux chapitres précédents dans le cadre de l'évaluation de politiques climatiques.

Le chapitre VI se penche ainsi sur les impacts pour l'économie française de l'instauration d'une taxation du carbone recyclée dans une baisse des prélèvements sur le travail. Il traite ce sujet sous deux angles différents : une première série d'exercices de statique comparative vise à préciser les mécanismes en œuvre dans le réajustement de l'économie perturbée par la taxation, en isolant le rôle des facteurs déterminants du second dividende détaillés dans les chapitres II et IV; une seconde série d'exercices

propose le chiffrage de quatre scénarios plausibles de combinaison de ces effets, pour tenter de délimiter un domaine de validité de l'hypothèse de double dividende.

Le chapitre VII reprend les résultats du chapitre VI, et s'intéresse à leurs effets redistributifs sur 35 branches d'activité française⁷², puis sur les marges de manœuvre qu'offrent les engagements internationaux de Kyoto dans la définition d'une politique climatique domestique qui compenserait dans une certaine mesure les branches les plus affectées dans leur compétitivité.

Enfin, le chapitre VIII présente des éléments de chiffrage, à nouveau au niveau maximum d'agrégation, de politiques climatiques internationales appliquées à différentes économies réelles projetées à 2030, et souligne l'impact de certaines caractéristiques économiques structurelles sur les résultats obtenus, dans le prolongement des raisonnements analytiques du chapitre II concernant l'effet sur les prix.

⁷² De nombreuses études portant sur différentes économies soulignent l'impact régressif d'une tarification du carbone sur les revenus des ménages—Poterba (1991), Jorgenson *et al.* (1992), Schillo *et al.* (1993), Bull *et al.* (1994) pour les États-Unis, Barker et Johnstone (1993), Symons *et al.* (1994) pour le Royaume-Uni, O'Donoghue (1997) pour l'Irlande, Harrison et Kriström (1999) pour la Suède. L'ensemble de ces références considère les effets d'équilibre général. Diverses manières de surmonter cet impact sont évaluées, principalement par une modification des hypothèses de recyclage des fonds levés : baisses de charges sur les bas salaires spécifiquement, réduction des taux de TVA, hausse des crédits d'impôt ou financement direct de mesures d'économie d'énergie pour les revenus les plus faibles. Dans la plupart de ces analyses, la neutralisation de l'effet régressif semble pouvoir être obtenue pour un coût total d'efficacité négligeable. Une désagrégation des résultats produits par IMACLIM selon trois catégories de revenu—distinguait les deux déciles supérieurs et les deux déciles inférieurs—a été opérée (Fortin 1999) et a abouti à des résultats similaires : les effets régressifs de premier ordre sont d'ores et déjà fortement atténués par un recyclage dans une baisse uniforme des charges.

Chapitre VI

Double dividende :

**le rôle du changement
technique**

Ce chapitre reprend des éléments publiés dans *Économie et Prévisions*, volume 23,
numéro 3, avril-juin 2000.

Introduction

Ce premier chapitre d'application du modèle IMACLIM étudie la question du double dividende dans le cas de l'économie française.

Il commence par présenter une analyse systématique des conditions théoriques de l'existence et de l'ampleur d'un éventuel deuxième dividende, hors progrès technique induit. Pour ce faire il procède au chiffrage de huit scénarios « tests » permettant de mettre en lumière l'importance des paramètres clefs distingués au chapitre II : comportements de consommation énergétique, effets de substitution dans l'appareil productif—et donc l'analyse est menée hors couplage avec un modèle *bottom-up*, afin de permettre la représentation d'hypothèses techniques contrastées—, qualité du recyclage du revenu de la taxe carbone et rigidités du marché du travail.

Il propose ensuite une application numérique dans le cas de la France, fixant ces paramètres à des niveaux plausibles, et se concentrant sur la prise en compte du progrès technique induit, directement dépendant de l'ampleur de l'effet d'éviction entre investissements de réduction des émissions de carbone et investissements de productivité générale.

Étant donné la persistance de la question du chômage dans l'économie française, le second dividende est mesuré à la fois par l'évolution de la consommation finale de bien composite—que l'on utilise comme une approximation de l'évolution du bien-être général, cf. chap. IV—et en termes d'emplois créés.

I. Déterminants du deuxième dividende hors progrès technique induit

Pour éviter que des discussions sur les hypothèses macro-économiques de scénarios énergétiques de long terme ne perturbent l'analyse des déterminants du double dividende, les évaluations numériques qui suivent sont menées sur la base de l'économie française en 1998 vue au travers du Rapport sur les Comptes de la Nation de l'INSEE (cf. annexe IV.2). L'analyse de statique comparative effectuée décrit donc l'équilibre économique auquel aurait mené l'introduction progressive de taxes carbone

(atteignant 200 à 2500 francs par tonne de carbone (F/tC) en 1998) au cours des années 1980 ou à la fin des années 1970, par exemple en réaction aux chocs pétroliers.

Les tests présentés ci-après visent à isoler l'influence spécifique des déterminants du second dividende hors progrès technique induit (ils représentent des expériences numériques qui n'ont d'autre but que d'évaluer l'influence de chaque paramètre et ne sauraient prétendre à un quelconque réalisme).

Test 1

Structures de production et de consommation inélastiques aux prix.
Salaires nets fixes.
Productivité des facteurs fixe.

Test 2

Structures de production et de consommation inélastiques aux prix.
Salaires nets fixes.
Rendements décroissants.

Test 3

Structures de production et de consommation inélastiques aux prix.
Élasticité positive des salaires nets à l'emploi, chômage dans le scénario de référence.
Rendements décroissants.

Test 4

Structures de production et de consommation inélastiques aux prix.
Élasticité positive des salaires nets à l'emploi, plein emploi en référence.
Productivité des facteurs fixe.

Test 5

Substituabilité énergie/travail faible dans la production.
Consommations d'énergie des ménages inélastiques aux prix.
Élasticité positive des salaires nets à l'emploi, chômage dans le scénario de référence.
Rendements décroissants.

Test 6

Substituabilité énergie/travail forte dans la production.
Consommations d'énergie des ménages inélastiques aux prix.
Élasticité positive des salaires nets à l'emploi, chômage dans le scénario de référence.
Rendements décroissants.

Test 7

Substituabilité énergie/travail forte dans la production.
Substituabilité énergie/bien composite faible dans la consommation.
Élasticité positive des salaires nets à l'emploi, chômage dans le scénario de référence.
Rendements décroissants.

Test 8

Substituabilité énergie/travail forte dans la production.
Substituabilité énergie/bien composite forte dans la consommation.
Élasticité positive des salaires nets à l'emploi, chômage dans le scénario de référence.
Rendements décroissants.

Les résultats de ces tests cités dans la suite du texte sont rassemblés en annexe VI.1.

Encart VI.1 Définition des expériences numériques

1.1. Tests 1 à 4 : technologie fixée

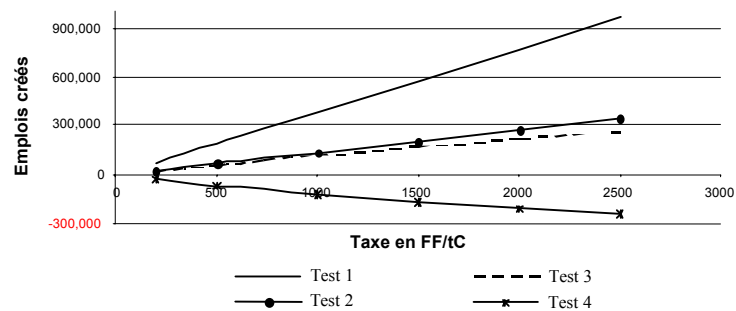
Les quatre premiers tests se font en supposant des structures de consommation et de production fixées, soit une inélasticité des intensités en travail, capital et énergie de la production, et une constance du ratio réelle entre consommations d'énergie et de bien composite des ménages. On résume ces hypothèses en évoquant une série de tests à technologie fixée.

Dans ce cadre d'analyse, le test n°1 a pour fonction de mettre en évidence le mécanisme quasi-keynésien « pur » qui préside au double dividende lorsque l'on prend pour référence une situation d'équilibre de sous-emploi. Il suppose outre la constance des intensités de la production, la fixité de la productivité globale de ces facteurs (pas de rendements décroissants ni de progrès technique endogène). Les résultats obtenus sont constamment positifs en termes d'emploi comme de consommation des ménages. Leur détail, présenté en annexe VI.1, permet de saisir le mécanisme sous-jacent : la stabilité des consommations d'énergie fournit une nouvelle assiette fiscale assez large pour permettre une forte diminution des cotisations sociales et un transfert important des prélèvements en direction des revenus non salariaux, d'où une baisse sensible des taxes qui retombent sur les facteurs de production. En conséquence, les coûts de production chutent (jusqu'à plus de 7%), et entraînent une forte baisse des prix donc une hausse de pouvoir d'achat qui s'avère suffisante pour compenser la croissance de la facture énergétique des ménages et permettre une hausse de la consommation finale du bien composite. Les volumes exportés croissant en outre jusqu'à +26% grâce à la chute des coûts de production, on obtient une trajectoire de croissance (production de bien Q) plus élevée.

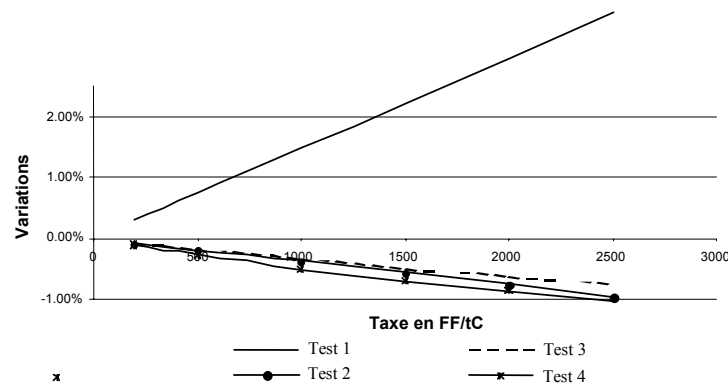
Le deuxième test ne fait que corriger ce résultat en introduisant le jeu de rendements décroissants dans la production. Leur prise en compte confère à la croissance une tendance inflationniste; la baisse des coûts de production est donc plus modérée (de 2,9% au maximum), et l'équilibre résultant nettement moins optimiste qu'au test 1 : même si une plus grande intensité de la production en travail permet une amélioration de l'emploi, la consommation des ménages baisse par détérioration du pouvoir d'achat.

Le test n°3 ajoute à l'effet inflationniste des rendements décroissants celui d'une élasticité des salaires nets à l'emploi : la diminution du taux de chômage exerce une pression à la hausse des salaires nets lors du partage du produit des écotaxes, selon le mécanisme décrit en annexe IV.1. Les résultats du test n°2 sont donc un peu plus dégradés, la baisse des coûts de production ne culminant plus qu'au-dessous de 2,3%.

Les courbes des graphiques VI.1 et VI.2 permettent de visualiser ces trois résultats. Elles illustrent la divergence observée entre performances en termes de créations d'emplois, positives dans les trois tests, et en termes d'évolution de la consommation des ménages, cette dernière baissant dès lors que sont pris en compte des mécanismes de hausse endogène des prix du bien composite.



Graphique VI.1 Créations d'emplois, tests 1 à 4



Graphique VI.2 Consommation des ménages, tests 1 à 4

Le dernier test de cette première série à technologie fixée reprend les hypothèses du test n°3, mais suppose une situation de référence de plein emploi. Le mécanisme quasi-keynésien est alors bloqué, la totalité des baisses potentielles de charges sur le travail étant affectées à une augmentation du salaire net⁷³. Les résultats sont donc négatifs non seulement en termes de consommation mais aussi d'emploi, et, quoique par un mécanisme différent, rejoignent ceux des modèles d'équilibre général en marchés

⁷³ Cette spécification est fondée sur l'hypothèse qu'une situation de plein emploi suppose un pouvoir de négociation fort des salariés.

parfaits, dans la lignée théorique des résultats de Bovenberg et Goulder (cf. chap.II) : la hausse du salaire d'équilibre ne peut compenser celle des prix (près de 2% pour le bien composite), qui intègre mécaniquement les effets directs et indirects de l'écotaxe, et les pertes de pouvoir d'achat résultantes grèvent la consommation des ménages. Cet effet se conjugue à une baisse des volumes exportés pour entraîner un ralentissement de l'activité, et donc (l'intensité en travail étant fixée) des destructions d'emploi.

1.2. Tests 5 à 8 : impact des adaptations dans la production et la consommation

La série des tests n°5 à 8 vise à cerner comment les résultats du test n°3 se transforment lorsqu'on considère les effets incitatifs des nouveaux prix relatifs—compte tenu d'un niveau donné de « décarbonisation » de l'offre d'énergie⁷⁴—sur les comportements d'offre et de demande intermédiaire et finale d'énergie.

On commence tout d'abord par vérifier que la taxation des revenus non salariaux suffit à contrebalancer le mécanisme par lequel la substitution de prélèvements ne produit pas de second dividende en emploi (cf. chap. II). Pour cela, on modélise une demande des ménages totalement inélastique aux prix, tandis que les entreprises réagissent à la taxe carbone (tests n°5 et 6).

Les résultats de l'un et l'autre test vont dans le même sens, mais sont très nettement améliorés lorsqu'on considère une élasticité-prix des consommations intermédiaires forte (test n°6).

On obtient bien sous les deux hypothèses un gain d'emplois qui tend pour le test n°6 vers l'optimisme du test n°1, mais selon un mécanisme distinct : la baisse du prix du bien composite est moindre (1,2% au maximum) puisque la ponction sur les revenus non salariaux est contrebalancée par la croissance du salaire net moyen; la consommation des ménages en bien composite est en outre contrainte par une hausse très forte de la facture énergétique, que ne parvient pas à compenser la double hausse des salaires et de leur pouvoir d'achat; la progression de l'emploi provient donc

⁷⁴ Les possibilités de diminution du taux moyen d'émission de gaz carbonique par unité d'énergie consommée sont faibles en France, du moins à moyen terme compte tenu de l'importance du nucléaire dans l'offre électrique; elles sont ici limitées à 15% pour des niveaux de taxe élevés.

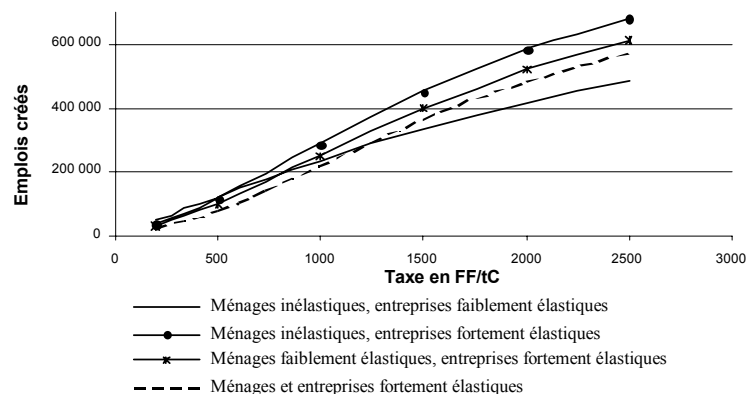
essentiellement de la hausse de l'intensité en travail du bien composite (jusqu'à +2,6%) et non plus d'une hausse de l'activité.

La consommation des ménages est quant à elle trop grevée par leur facture énergétique pour progresser, compte tenu de l'évolution trop peu favorable des prix de production. Tout au plus résiste-t-elle mieux—elle est quasiment stabilisée—lorsque les hypothèses technologiques sont optimistes, le revenu disponible brut étant alors dopé par les plus fortes progressions de l'intensité en travail.

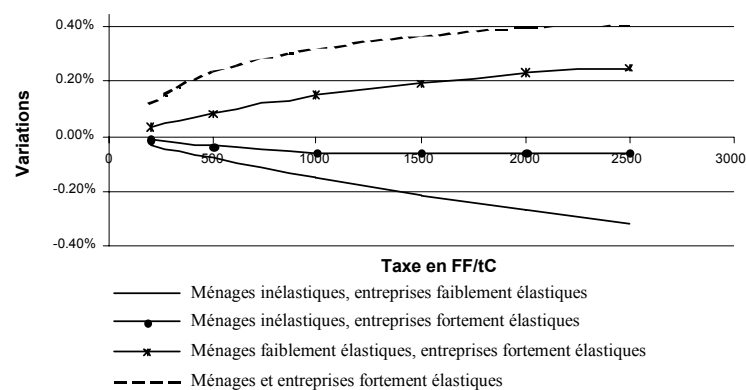
On constate ainsi que la hausse de la facture énergétique des ménages est un élément décisif de blocage du mécanisme quasi-keynésien de relance de la demande finale de long terme.

Les tests 7 et 8 vérifient pour une élasticité-prix forte de la consommation d'énergie des entreprises, l'impact d'élasticité faible puis forte de la consommation des ménages. Contrairement aux résultats qui précèdent, on observe une légère hausse des prix croissant avec le niveau de taxe, qui s'explique par la prise en compte d'une érosion forte de l'assiette fiscale de l'écotaxe conduisant à un moindre transfert de charges au bénéfice de la production. Mais l'effet négatif de la hausse des prix est contrebalancé par une moindre hausse de la facture énergétique des ménages. Ces économies relatives permettent une relance par la consommation du bien Q , malgré une évolution du solde commercial nettement moins optimiste du fait de la hausse légère des prix, mais toujours légèrement avantageuse grâce à une forte diminution des importations d'énergie (de près de 14%). En d'autres termes, l'effet d'érosion de la base fiscale est plus que compensé par la relance de l'activité due à une hausse de la demande finale de biens composite en termes réels (atténuée par la dégradation du solde commercial).

Les graphiques VI.3 et VI.4 illustrent ces résultats et démontrent l'impact des hypothèses prises en matière d'élasticité de demande des ménages et des entreprises. Le gain en emploi est plus robuste que celui de la consommation des ménages, ces deux critères étant découplés par le jeu des exportations et surtout de la hausse de l'intensité en travail (+1,35% au minimum). Remarquons enfin que, lorsqu'il existe, le deuxième dividende en termes de consommation finale se sature mais ne diminue pas, contrairement à ce que nous allons obtenir ci-dessous avec l'introduction du changement technique induit.



Graphique VI.3 Créations d'emplois, tests 5 à 8



Graphique VI.4 Consommation des ménages, tests 5 à 8

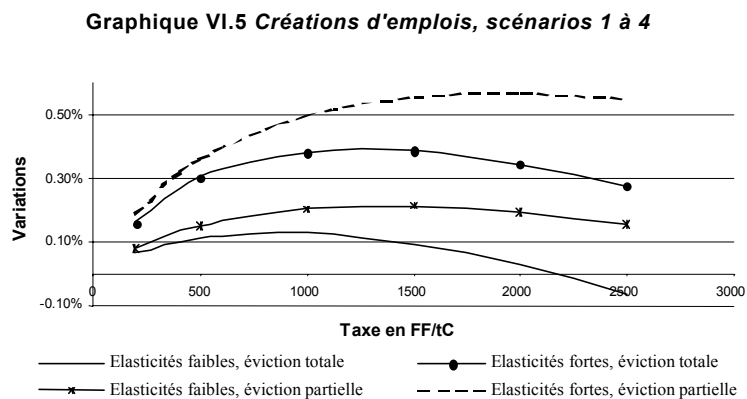
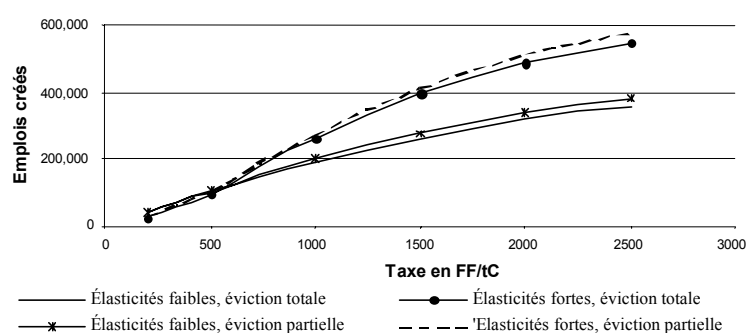
II. Introduction du progrès technique induit et évaluation du domaine de validité d'un double dividende « fort »

Cette seconde partie synthétise les résultats précédents à travers des scénarios économiquement plausibles complétant les mécanismes pris en compte ci-dessus par celui du progrès technique induit, et traduisant des anticipations différentes concernant :

- les paramètres de réaction aux prix : on adoptera contrairement aux tests précédents des hypothèses optimistes ou pessimistes à la fois pour les entreprises, les ménages ou la décarbonisation de l'offre énergétique,

- l'effet d'éviction : une hypothèse pessimiste considérera que tout effort d'investissement en économie de carbone entraîne une baisse de la productivité globale des facteurs proportionnelle à la baisse des investissements en bien composite; une hypothèse optimiste envisagera une compensation de cet effet à hauteur de 50%⁷⁵ seulement, du fait d'externalités croisées de l'innovation.

Les graphiques VI.5 et VI.6 résument les résultats obtenus, détaillés en annexe VI.1 :



En première analyse, on peut faire ressortir les éléments suivants :

- si l'évolution de la consommation des ménages ne peut être que faiblement positive (au plus d'un demi-point), des écotaxes recyclées par une baisse du coût du travail sont à même de transformer en un gain net le coût économique

⁷⁵ Soit : 50% de la FBCF dans l'offre et la conservation d'énergie est sans impact sur la productivité des facteurs; l'autre moitié de cette FBCF a le même effet sur cette productivité que la FBCF générale (cf. chap. IV et annexe IV.1 pour le détail de la spécification du coefficient de progrès technique Φ).

brut des politiques environnementales jusqu'à 2000 FF/tC, pour le moins au niveau d'agrégation retenu ici;

- les quatre courbes de cette consommation sont « en cloche » contrairement à ce qui apparaissait aux tests précédents. Ceci est clairement dû au jeu de l'effet d'éviction, qui commence à l'emporter sur le mécanisme de relance de la demande à partir de 600FF/tC dans le cas pessimiste, et 1900 FF/tC dans le cas le plus optimiste. Il y a donc un « optimum » au-delà duquel le deuxième dividende décroît. On met ainsi en évidence la possibilité d'un choix, au sein même des politiques « sans regret », entre maximum d'efficacité environnementale (écotaxes portées au point où le double dividende s'annule) et maximisation du bien-être du consommateur;
- sur l'ensemble de l'intervalle testé, en revanche, les créations d'emploi continuent de progresser. Ce décalage entre effet sur la consommation et effet emploi s'explique en partie par une production totale soutenue par la croissance des exportations nettes dans les deux scénarios où il y a baisse des prix de production. Mais il s'explique surtout par le fait que les substitutions entre facteurs de production continuent d'opérer. La saturation des effets de substitution devrait à terme entraîner une décroissance du gain net en emploi, mais cette saturation n'opère pas suffisamment dans les plages de taxe testées ici. On débouche donc sur un second arbitrage possible, entre emploi, réduction d'émission et consommation.

Ces remarques d'ordre général étant formulées, on peut développer une analyse plus fine des résultats obtenus en s'appuyant sur l'ensemble des tests de sensibilité, en particulier afin de préciser les déterminants de l'effet de relance par la consommation. L'effet de la hausse de l'emploi par unité produite, et la hausse correspondante des salaires peuvent être, on l'a vu, contrecarrés par deux facteurs principaux : l'augmentation des dépenses d'énergie des ménages et la hausse des prix du bien composite.

À partir d'un certain niveau de taxe, en effet, l'élasticité prix diminuant, la baisse de la consommation d'énergie des ménages n'est plus assez forte, et en conséquence le renchérissement de l'énergie débouche sur une baisse du revenu disponible pour l'achat de bien composite. Ceci explique l'importance du progrès technique économisant l'énergie pour les ménages : dans tous nos scénarios l'hypothèse d'une pénétration rapide est systématiquement plus favorable que celle d'une pénétration lente. Ce résultat répond aux craintes concernant l'érosion de la base fiscale en cas d'économies

d'énergie fortes. Dans l'hypothèse d'une pénétration lente du changement technique, une base fiscale moins évanescence permet des réductions de charges très supérieures et croissantes sur l'intervalle de taxes testé, donc une hausse de l'emploi unitaire et une limitation de la hausse des prix. Mais l'explosion de la facture énergétique des ménages grève considérablement l'effet relance. En limitant la perte de revenu disponible pour l'achat de biens composite tout en conservant un transfert significatif de la fiscalité sur les revenus non salariaux, des économies d'énergie importantes maximisent en revanche le mécanisme quasi-keynésien. À cela s'ajoute un effet technique non négligeable : la neutralité fiscale de la mesure évaluée est calculée sur la masse totale des prélèvements obligatoires, et non simplement sur la part de ces prélèvements afférente aux écotaxes; dans cette perspective, la progression d'autres bases fiscales, TVA, impôts sur le revenu des ménages, est aussi à prendre en compte, ce qui permet des diminutions de charges sur le travail et donc sur la production quelles que soient les hypothèses testées, tant qu'on observe une hausse de la production.

On voit donc, en résumé, et pour rejoindre les analyses développées au chapitre II, le rôle crucial que joue l'évolution du prix du bien composite. Cette évolution est la résultante de plusieurs effets contradictoires :

- l'effet inflationniste direct de la taxe sur la consommation intermédiaire d'énergie, qui retombe effectivement en partie sur les coûts de production; de ce point de vue, une forte élasticité prix de la demande d'énergie des entreprises constitue une hypothèse favorable,
- l'effet déflationniste indirect du recyclage du produit de cette taxe vers une baisse du coût du travail; de ce point de vue, une demande inélastique des ménages constitue une hypothèse favorable,
- l'effet de la variation du salaire net, inflationniste tant que le niveau de l'emploi est supérieur dans l'équilibre dérivé; il est déflationniste dans le cas contraire et exerce alors un effet compensateur de l'effet récessif de l'écotaxe,
- l'effet des rendements d'échelle décroissants, inflationniste (hausse des consommations unitaires marginales de facteurs dans la production) lorsque la production de bien composite augmente, il est déflationniste en cas de baisse de la production et exerce alors un effet compensateur,
- l'effet du progrès technique induit, déflationniste tant que la production de bien composite augmente; des tests de sensibilité ont montré que cet effet ne dépend

que marginalement de l'hypothèse sur l'écart entre productivité potentielle et potentialité réelle; il est en revanche fortement dépendant de l'ampleur de l'effet d'éviction.

On remarque pour finir la différence marquée, dans la formation du deuxième dividende, entre deux dimensions du changement technique induit par l'écotaxe, la substitution entre facteurs et l'effet d'éviction. Ce dernier en effet a surtout un impact direct sur les coûts de production et sur le pouvoir d'achat réel des ménages, et n'a qu'un impact très indirect sur l'évolution de la consommation unitaire de travail (*via* l'impact du prix du bien composite qui intervient dans la formation du prix de l'énergie). C'est ce qui explique que la variation du coefficient d'éviction n'affecte que marginalement l'emploi alors qu'il modifie très sensiblement la courbe de consommation des ménages (graphiques VI.5 et VI.6).

En définitive, on peut considérer comme robustes les conclusions suivantes dans le cas de l'économie française :

- il existe des possibilités de double dividende au sens fort, mais celui-ci est toujours quantitativement modéré en raison des rétroactions dues aux effets d'équilibre général. Le mécanisme vertueux déclenché par l'augmentation de l'intensité en travail de la production (combinaison de choix techniques différents, mais aussi d'une évolution structurelle vers les branches plus intensives en travail) est possible parce que le transfert de charge fiscale n'est pas à somme nulle pour le secteur productif; une écotaxe est en fait une taxe implicite sur les revenus non salariaux (dont les revenus de transfert), ce qui abaisse la pression fiscale subie par les entreprises;
- un paramètre majeur du deuxième dividende est le point d'équilibre entre deux conséquences de l'érosion de l'assiette fiscale. D'un côté celle-ci limite le basculement des charges fiscales vers des assiettes ne retombant pas directement sur les coûts de production. De l'autre, elle permet d'une part l'enclenchement d'un mécanisme de relance, puisqu'une moindre hausse de la facture énergétique des ménages libère du revenu pour l'achat de bien composite; elle favorise d'autre part une baisse des coûts de production, parce qu'une plus grande élasticité offre aux entreprises la possibilité d'échapper à la hausse des taxes carbone et de profiter à plein du transfert de fiscalité;
- le relèvement des salaires nets ne suffit pas pour inverser les résultats positifs dans la spécification retenue, notamment du fait du fort taux de chômage de l'économie française en 1998 (12,3%), qui laisse supposer des marges de

manœuvre considérables avant que le pouvoir de négociation des salariés n'augmente au point de capter l'essentiel des baisses de charges autorisées par le basculement de fiscalité. En revanche, l'importance de l'évolution du salaire net dans l'ampleur du deuxième dividende suggère qu'on ne peut isoler une réforme fiscale écologique de la négociation sociale sur les salaires et de la politique salariale;

- les hypothèses concernant l'effet d'éviction subi par le progrès technique hors énergie, si elles n'ont qu'un impact limité sur le volume d'emploi créé, sont en revanche primordiales en ce qui concerne la consommation des ménages.

Ceci ne fait que confirmer l'utilité de compléter les écotaxes par des schémas incitatifs à même de renforcer les efforts de recherche et développement sur les technologies alternatives, sans négliger l'innovation et l'adoption de technologies efficaces au niveau des usages finaux, pour éviter que leur instauration ne provoque un trop grand relèvement des dépenses énergétiques des ménages;

Conclusion : un agenda de recherche pour le futur

L'ordre de grandeur des résultats présentés peut paraître rassurant ou décevant selon ce que l'on attend des écofiscalités. Il est rassurant en ce sens que l'idée d'un double dividende apparaît robuste à plusieurs tests paramétriques pour peu que l'on veille à l'effectivité du recyclage du produit de la taxe instaurée. Il est décevant dans la mesure où l'impact sur la consommation reste marginal et où la hausse de l'emploi, certes significative, n'est pas décisive.

Il nous faut cependant insister sur les limites d'expériences numériques conduites à partir d'un haut niveau d'agrégation de l'économie; une telle approche permet certes de rendre plus transparent le jeu croisé des paramètres déterminant l'ampleur du second dividende, mais elle masque les effets redistributifs des politiques testées sur les revenus des ménages comme sur les gains des secteurs productifs.

Concernant les ménages, la difficulté vient de ce qu'à la fois les hauts et très bas revenus seraient davantage touchés du fait de la répartition de la consommation d'énergie (en particulier de celle des carburants) (GIEC 1996). Il importe donc d'étudier avec précision compensations et mesures complémentaires à même de limiter

ces inégalités. Des travaux préliminaires soulignent dans cette perspective la possibilité d'une affectation prioritaire du produit des écotaxes à la baisse des charges sur les bas salaires (CCE 1994, Picketty 1997).

En matière de divergence des effets sectoriels, on sait (Giraud, Nadaï 1994) la très grande hétérogénéité des intensités en travail et en énergie des différents secteurs de production. Le chapitre qui suit propose de fait une désagrégation des résultats obtenus sur deux secteurs pour évaluer les pertes de compétitivité encourues, et démontre comment l'articulation des politiques climatiques nationales et de l'accord international pris à Kyoto pourrait permettre de surmonter l'obstacle.

Dans un sens plus favorable au double-dividende cette fois, il convient de prolonger l'analyse dans la prise en compte des comportements d'embauche des entrepreneurs. En situation d'incertitude et d'encadrement du marché du travail en effet le travail est un facteur de production plus rigide que l'énergie dont la demande est corrélée au cycle des affaires de chaque industrie; les écotaxes permettent de remplacer un impôt contracyclique (avec taxe implicite sur les sureffectifs) par un impôt corrélé au cycle des affaires.

En d'autres termes, si le potentiel d'un deuxième dividende significatif d'écotaxes semble être établi, il reste que, au-delà de la mécanique économique pure, les paramètres de commande de sa réalisation (modalités du recyclage, lien avec la discussion salariale, crédibilité de la neutralité budgétaire, prédictibilité de l'évolution de la politique engagée, actions d'accompagnement sur l'innovation ou pour pallier certains effets redistributifs, partage entre secteurs soumis à taxation et secteurs entrant dans des systèmes de permis négociables) seront déterminés par la qualité des compromis passés entre les divers acteurs sur les modalités de mise en place.

Chapitre VII

Politiques climatiques et distorsions de concurrence

Ce chapitre reprend des éléments publiés dans la *Revue d'Économie Industrielle* n°83 (1^{er} trim. 1998) et dans la *Revue Française d'Économie* vol. XVI n°2 (oct. 2001).

Introduction

On ne peut manquer de constater combien la réalité des politiques climatiques mises en œuvre ces dernières années diverge des conclusions théoriques multiples développées dans les chapitres précédents. Ces divergences sont d'autant plus frappantes qu'elles se situent pour beaucoup au premier embranchement de l'arbre des choix qui s'offrent en la matière aux gouvernements : la grande majorité des mesures prises concernent des normes d'équipement ou d'émissions, en lieu et place de taxes ou de permis d'émission négociables, au bilan macroéconomique pourtant supérieur quelles que soient les modalités de leur mise en place ou du recyclage de leurs éventuels revenus.

Une des raisons principales de ce hiatus est l'opposition des industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE) à des réformes perçues comme la source de lourdes distorsions de concurrence vis-à-vis de leur compétiteurs étrangers. Notamment, les pressions exercées par les milieux industriels ont conduit aux États-Unis à l'échec du projet de *BTU tax* de la première administration Clinton, ou encore, dans les rares pays ayant franchi le pas de la taxation des émissions de carbone (Suède, Danemark, Pays-Bas, Norvège, Finlande, Royaume-Uni), à l'exemption partielle ou totale des secteurs les plus consommateurs d'énergie.

Le protocole de Kyoto en prévoyant l'instauration d'un système international d'échanges de permis d'émission négociables (PEN) entre parties signataires, modifie les termes de ce débat dans deux directions contradictoires :

- d'un côté la mise en place de taxations domestiques du carbone est susceptible de s'en trouver facilitée : plutôt que d'exempter les IGCE de tout ou partie d'un effort requis des autres branches, mesure dont l'équité est manifestement contestable, les parties au protocole disposent d'une marge de manœuvre supplémentaire qui consiste à leur rétrocéder une part de leur quota et à leur donner l'accès au marché international, pour une distorsion de concurrence d'ampleur potentiellement intermédiaire. La Commission européenne (CEE 2000) ainsi que de nombreux pays de l'OCDE (Sonneborn 1999) étudient de telles combinaisons. En France notamment, il était prévu que la future taxe générale sur les activités polluantes évolue partiellement vers un système de permis négociables (MIES 2000, pp. 111-12);

- de l'autre, le prix des permis internationaux ne saurait manquer d'exercer une pression à la baisse sur le niveau de taxe domestique acceptable par les acteurs économiques. Si ce prix était « trop » bas, comme le laissent craindre les conclusions de notre premier chapitre considérant les accords de Marrakech, il pourrait donc occasionner une érosion du produit de la taxe source du double-dividende (Grubb *et al.* 2001). D'aucuns envisagent même une incitation au démantèlement des fiscalités sur l'énergie préexistantes, qui constituent des taxes carbone implicites. Paradoxalement, l'aboutissement d'un accord international découragerait alors l'innovation, et conduirait sur le long terme à un accroissement des émissions (Ha-Duong *et al.* 1999)⁷⁶.

L'évaluation des liens entre politiques climatiques domestiques et internationales et distorsions de concurrence dépasse donc l'analyse d'impacts économiques purement « mécaniques » pour toucher à des considérations d'économie politique, manifestement hors du champ de prospective d'un modèle comme IMACLIM. L'analyse systématique des mécaniques en œuvre n'en demeure pas moins nécessaire, dans la mesure où elle fournit les bases indispensables du débat d'économie politique.

Une telle analyse fait l'objet de ce chapitre, qui la mène en trois étapes. Il commence par préciser l'ampleur du risque de perte de compétitivité de l'économie française dans l'hypothèse la plus pessimiste—et tout à fait théorique—où la France seule appliquerait une taxe carbone. Dans un deuxième temps il présente les trois principaux paramètres sur lesquels un État peut jouer dans l'instauration d'une taxation ou d'un plafonnement de ses émissions. Enfin, il propose une étude comparative des conséquences macroéconomiques de six scénarios combinant ces paramètres, en étudiant notamment différents régimes particuliers aux IGCE à même d'atténuer d'éventuels impacts sur la concurrence. L'objectif sous-jacent est de rejoindre les conclusions de Bovenberg et Goulder (2000), en démontrant que les pertes de compétitivité des IGCE peuvent être limitées en conservant l'essentiel du double-dividende fort obtenu dans un cadre agrégé au chapitre précédent.

⁷⁶ On retrouve ici les termes de la querelle sur la « complémentarité » des instruments internationaux aux mesures domestiques ayant opposé l'Union européenne aux États-Unis dans les négociations internationales (cf. chap. I).

I. Distorsions de concurrence de l'équilibre partiel à l'équilibre général

De toute évidence, les résultats optimistes⁷⁷ présentés au chapitre précédent ne suffisent pas en eux-mêmes à apaiser les craintes des IGCE françaises : le niveau d'agrégation retenu masque de fortes disparités sectorielles. Notamment, les impacts sur les coûts de production, négligeables pour la plupart des branches, sont potentiellement plus marqués pour des activités comme la sidérurgie, la production de ciment ou d'aluminium (Giraud, Nadaï 1994). L'objet de cette partie est, en isolant les coûts bruts de l'énergie et du travail de 35 branches d'activités⁷⁸, d'évaluer comment l'instauration d'une taxe carbone affecte leur compétitivité. L'analyse est menée en quatre étapes, afin de mettre en lumière l'importance de la prise en compte :

- concernant les entreprises, des effets d'adaptation (de substitution entre consommations intermédiaires d'énergie et de travail) suscités par la réforme;
- concernant les pouvoirs publics, des modalités de mise en place de la réforme, et notamment de l'extension de la taxation aux émissions de carbone des ménages, ainsi que du recyclage du produit de la taxe dans une diminution des prélèvements sur le travail, qui incidemment accélère les mécanismes d'adaptation précités.

Trop souvent, en effet, l'étude des impacts sectoriels d'une taxe carbone est faite « toutes choses égales par ailleurs », sans prise en compte des adaptations techniques, et sans mise en relation des distorsions de concurrence respectivement liées aux taxes sur l'énergie et aux prélèvements sur le travail, primordiales dès lors qu'un recyclage dans une baisse de ces prélèvements est envisagé (Giraud, Nadaï 1994 ; Quirion 2002).

Le cadre d'analyse retenu, l'adoption isolée d'une taxe carbone, peut être interprété comme l'hypothèse la plus défavorable d'articulation avec les décisions de Kyoto : la France est la seule partie au protocole à instaurer une taxation permettant le strict respect de ses engagements sans recours aucun aux mécanismes de flexibilité—ou de

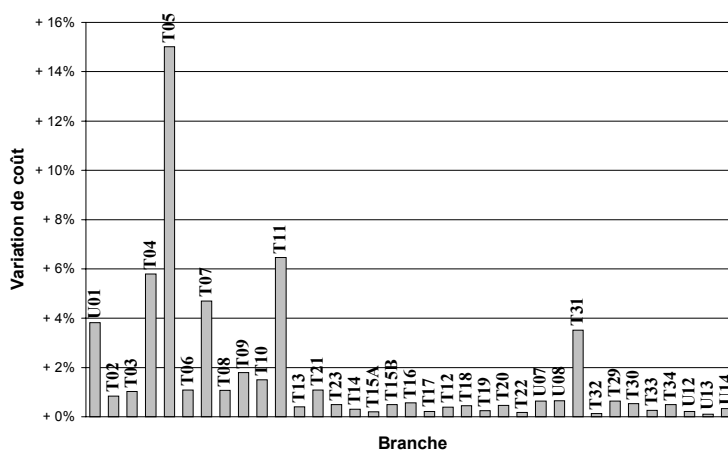
⁷⁷ Variations du coût de production du bien composite de -0,42 à +0,6% sur les quatre scénarios et l'intervalle de taxation testé (cf. tableaux en annexe VI.1).

⁷⁸ La somme des deux coûts constitue 29% de la production distribuée en France en 1998 (cf. annexe IV.2 tab. A.6).

manière équivalente à rétrocéder aux enchères les quotas d'émissions négociés sans accès au marché international—tandis que ses concurrents tirent avantage du marché international des permis et de l'inflation des crédits de séquestration, tant et si bien qu'ils parviennent à annuler purement et simplement les coûts de leurs engagements (cf. les estimations de prix de marché nul en clôture du chap. I).

I.1.1. Équilibre partiel sans prise en compte du recyclage

Considérant un total d'émissions de référence de 116 millions de tonnes de carbone en 2010⁷⁹, IMACLIM indique que la taxe carbone nécessaire au respect de l'engagement français pris à Kyoto serait de 850 francs par tonne de carbone. Le bilan I présente l'impact d'une telle taxe sur la somme actuelle des coûts énergétiques et d'emploi de 35 branches industrielles—les nomenclatures sont définies tab. VII.1—, en l'absence de recyclage de son produit et à technologie fixe, (intensités en énergie, en travail et en capital inchangées), soit selon une logique d'équilibre partiel où la taxe est mécaniquement appliquée aux émissions de carbone des branches sans influence sur celles-ci. À ce niveau d'analyse la taxe provoque des surcoûts de plus de 3% pour les industries agricoles et alimentaires, la production de coke, la première transformation des métaux ferreux, la chimie de base et les transports, et qui culminent à environ 15% pour les industries pétrolières et gazières.



Graphique VII.1 *Bilan I*

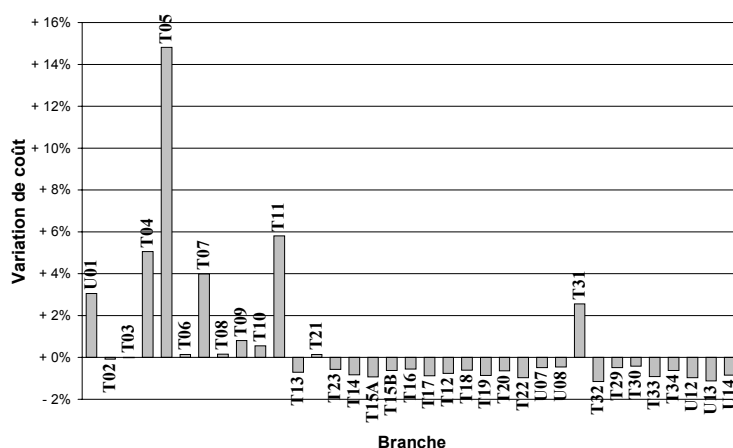
⁷⁹ Cette estimation est celle du scénario central du Commissariat Général du Plan (Boisson, Criqui 1998) en la matière.

U01	Agriculture - Sylviculture – Pêche	Agriculture - Sylviculture - Pêche (T01)
U02	Industries agricoles et alimentaires	Industrie de la viande et du lait (T02) Autres (T03)
U03	Production et distribution d'énergie	Production de CMS et cokéfaction (T04) Production de pétrole et de gaz naturel (T05) Production et distribution d'électricité (T06) Distribution de gaz (T06) Distribution d'eau et chauffage urbain (T06)
U04	Industries des biens intermédiaires	Prod. de minerais et mét. ferreux - Prem. transf. de l'acier (T07) Production de minerais, mét. et demi-produits non ferreux (T08) Production de matériaux de construction et minéraux divers (T09) Industrie du verre (T10) Chimie de base, production de fils et fibres art. et synth. (T11) Fonderie et travail des métaux (T13) Industries du papier carton (T21) Industries du caoutchouc et de la transf. des mat. plastiques (T23)
U05	Industries des biens d'équipements	Industries des biens d'équipement professionnels : Construction mécanique (T14) Const. des mat. électriques et électroniques professionnels (T15A) Construction navale et aéronautique (T17) Industries des biens d'équipement ménagers (T15B) Const. de véhicules auto. et d'autres mat. de transp. terrestre (T16)
U06	Industries des biens de conso. courante	Parachimie et industrie pharmaceutique (T12) Industries textiles et de l'habillement (T18) Industries du cuir et de la chaussure (T19) Industries du bois et de l'ameublement; industries diverses (T20) Imprimerie, presse, édition (T22)
U07	Bâtiment, génie civil et agricole	Industrie de mise en œuvre du bâtiment génie civil et agricole (T24)
U08	Commerce	Commerce de gros alimentaire (T25) Commerce de gros non alimentaire (T26) Commerce de détail alimentaire (T27) Commerce de détail non alimentaire (T28)
U09	Transports et télécommunications	Transports (T31) Télécommunications et postes (T32)
U10	Services marchands	Réparations automobiles (T29) Hôtels, cafés et restaurants (T30) Services marchands aux entreprises (T33) Services marchands aux particuliers (T34)
U11	Location immobilières	Location immobilières (T35)
U12	Assurances	Assurances (T36)
U13	Organismes financiers	Organismes financiers (T37)
U14	Services non marchands	Services non marchands (T38)

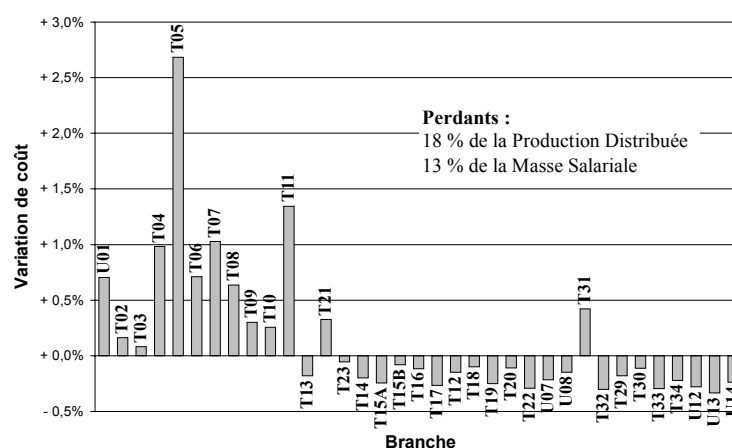
Tableau VII.1 Nomenclature des branches (INSEE)

I.1.2. Équilibre partiel avec recyclage direct

Le bilan II reprend le raisonnement en équilibre partiel du bilan I, mais en envisageant un recyclage des prélèvements effectués dans une baisse des charges sociales, et représente donc un transfert à somme nulle de charge fiscale entre les entreprises intensives en travail et celles intensives en énergie. En comparaison du bilan I, l'ensemble des branches voient donc leur surcoût baisser dans la mesure de leur intensité en travail, et les branches perdantes ne regroupent plus *ex ante* que 14% de la production distribuée et 10% de la masse salariale. Les branches les plus touchées du bilan I restent malgré tout fortement perdantes : intensives en énergie et peu en travail, elles ne bénéficient pas de la réforme.



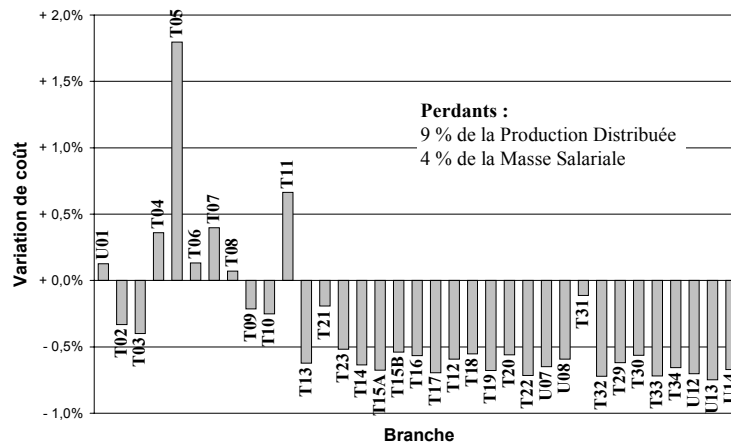
suppose une baisse des consommations d'énergie donc une diminution du produit recyclé.



Graphique VII.3 Bilan III

I.1.4. Équilibre général, taxation étendue aux ménages

Le bilan IV étend l'analyse du bilan III en appliquant la taxation à l'ensemble des émissions de l'économie, et non plus uniquement aux émissions de la production. Regroupant l'ensemble des mécanismes détaillés dans IMACLIM, et prenant en compte à la différence du bilan III un transfert de charge depuis la production vers les ménages, il donne la vraie mesure des enjeux : en dehors de la branche pétrole et dérivés les surcoûts restent inférieurs à 1,5%, et les activités susceptibles de subir une perte de compétitivité ne représentent plus *ex ante* que 9% de la production distribuée et 4% de la masse salariale.



Graphique VII.4 Bilan IV

En définitive, il apparaît que la prise en compte des effets d'adaptation, de recyclage et d'extension de la base fiscale atténue significativement les impacts sur les coûts que l'on peut estimer au premier ordre, au niveau T de la nomenclature INSEE, soit sur 35 grandes branches d'activité. Il demeure cependant que :

- les surcoûts enregistrés par les branches les plus touchées restent proches de 1%, ce qui, considérant la faible différenciation de leur production, n'est malgré tout pas négligeable, non seulement en termes de compétitivité sur les marchés, mais aussi en ce qui concerne l'attractivité d'un investissement industriel en France, ce que confirment les premières simulations du modèle G-Cubed (McKibbin, Wilcoxon 1995);
- un niveau plus fin de désagrégation pourrait laisser apparaître des situations extrêmes où la seule adoption d'une taxe serait particulièrement pénalisante; on peut notamment s'interroger sur le cas de la branche T05, en distinguant une industrie gazière bénéficiant d'un effet de substitution entre énergies (à contenu énergétique identique le gaz est nettement moins intensif en carbone que le pétrole) et d'une clientèle domestique captive, et une industrie pétrolière nettement moins avantagée.

Enfin, et en dernier ressort, la force de l'argumentaire développé au long de ces quatre bilans repose entièrement sur la crédibilité de l'affectation effective des revenus de la taxe dans une baisse des charges sur le travail.

Nous allons voir dans quelle mesure un dégrossissement de la politique climatique mise en place est susceptible d'offrir une flexibilité contribuant à surmonter les obstacles qui persistent. Pour cela nous commencerons par étudier les choix dont dispose un État dans l'instauration d'une taxation ou d'un quota des émissions de GES, avant de proposer un chiffrage de certaines configurations selon deux hypothèses de prix de marché des PEN internationaux.

II. Degrés de liberté dans la définition de politiques climatiques domestiques

Parmi les multiples degrés de liberté qui s'offrent aux autorités publiques dans la définition d'une politique climatique fondée sur l'utilisation d'instruments de marché, trois apparaissent particulièrement importants.

II.1. Niveau d'application de la contrainte

La majeure partie des émissions de gaz à effet de serre est constituée par le dioxyde de carbone, qui provient essentiellement de la combustion d'énergies fossiles : pétrole et ses dérivés, charbon, gaz naturel. Or, il est facile de calculer de manière précise le niveau des émissions à partir de celui des consommations, car au minimum 98% du carbone présent dans ces combustibles est rejeté dans l'atmosphère sous forme de CO₂ après combustion. Pour les sources énergétiques, le choix s'offre donc entre une limitation des émissions :

- en amont, en allouant des permis d'émission—ou en instaurant une taxe—au niveau des agents qui introduisent du carbone dans l'économie (producteurs et importateurs d'énergie fossile). Ces agents seront ainsi incités à réduire leurs propres émissions, mais surtout répercuteront le coût des permis dans le prix des produits énergétiques, et transmettront ainsi un signal prix général à tous les utilisateurs en aval. Un tel choix présente cependant le risque d'une forte dilution du signal au niveau des consommateurs finaux, par ailleurs peu informés sur les potentiels d'abattement (on retrouve le problème bien connu de la gestion de l'*efficiency gap* sur les usages finaux de l'énergie).

- en aval, au niveau des émetteurs directs de carbone. En raison de coûts de transaction et de contrôle qui deviendraient vite exorbitants, cette option ne peut qu'être limitée aux grands secteurs émetteurs (production d'électricité par combustion de fossiles, sidérurgie, cimenteries...). Elle suppose donc en pratique l'existence d'autres dispositifs pour les sources diffuses d'émission (consommations de carburant, consommations des PME, PMI...).

II.2. Attribution initiale des droits d'émission

On peut distinguer deux méthodes polaires d'attribution des droits :

- une attribution initiale des droits à la collectivité, par l'instauration d'un système de PEN aux enchères, ou d'une taxe sur l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre;
- une attribution initiale des droits aux émetteurs, sur la base de leurs émissions passées (*grandfathering*). Dans l'hypothèse d'un système de PEN les émetteurs se voient allouer gratuitement une part du quota national proportionnelle à leurs émissions pendant une période de référence (les cinq années précédant l'instauration du quota par exemple)⁸⁰. Une politique par les prix équivalente consiste à appliquer une taxe sur les émissions des entreprises au-delà d'un certain niveau de référence, calculé selon un pourcentage des émissions passées⁸¹; pour que la symétrie soit complète, il faut attribuer une subvention pour les réductions d'émissions au-delà du niveau de référence (Pezzey 1992).

Il est bien sûr possible de combiner ces deux règles d'attribution, en distribuant une partie des permis en *grandfathering* et en vendant le reste aux enchères (Bovenberg et Goulder 2000), ou en fixant les abattements de taxe à un niveau plus ou moins élevé selon les secteurs d'activité. Mais, pour des raisons de clarté, les simulations ci-après porteront strictement sur la pleine application de chacune des règles.

⁸⁰ C'est la règle de base retenue pour les permis d'émission de dioxyde de soufre instaurés en 1990 aux États-Unis.

⁸¹ Le projet français d'extension de la taxe générale sur les activités polluantes aux consommations intermédiaires d'énergie, censuré par le conseil constitutionnel en décembre 2000, se basait sur ce principe.

II.3. Champs d'accès des entités privées au marché international

Les PEN éventuellement émis par un État et exigés de tout ou partie de ses agents—ci après « domestiques »—sont créés pour être détenus par des entités privées. Ils ont nécessairement un statut juridique distinct de celui de permis prévalant dans d'autres pays, ou sur un marché international, tels les permis internationaux créés par le protocole de Kyoto, réservés aux parties au protocole (Lepage 1998). L'État reste parfaitement libre d'autoriser ou non ses firmes à échanger des permis d'émission domestiques avec des entreprises d'autres nationalités, sur la base d'accords bilatéraux ou multilatéraux de reconnaissance mutuelle.

Dans l'hypothèse d'une taxation, on peut envisager d'articuler un système de taxe avec abattement, tel que décrit plus haut, avec les permis internationaux du protocole de Kyoto. Pour cela, il suffit d'accorder un abattement supplémentaire à toute firme détentrice de permis internationaux.

Les trois degrés de liberté ainsi définis peuvent être croisés pour définir une multiplicité de politiques domestiques. La dernière partie de ce chapitre teste 6 configurations possibles, dans le but d'estimer dans quelle mesure il est possible d'accorder aux industries grosses consommatrices d'énergie un traitement particulier atténuant l'effet de compétitivité défini par le bilan IV ci-dessus, tout en préservant l'essentiel de la base du double dividende environnemental et économique par transfert de charge fiscale de l'emploi vers les émissions de GES.

III. Évaluation en équilibre général de 6 variantes de politiques domestiques

Le scénario de référence retenu dans les simulations d'IMACLIM qui suivent est celui établi par la Mission interministérielle de l'effet de serre (2000) pour le Programme national de lutte contre le changement climatique. Il prévoit une hausse des émissions

de dioxyde de carbone (CO₂) de 19% entre 1990 et 2010, soit un passage de 103,4 à 122,8 MtC⁸². À peu de choses près, cette projection correspond au scénario « État industriel » du Commissariat Général du Plan (Boisson, Criqui 1998), qui estimait à 14% la hausse des émissions en 2010 par rapport à 1990.

Par rapport au chapitre précédent, nous nous restreindrons à une hypothèse médiane concernant l'élasticité-prix de la décarbonisation, pour éviter qu'une multiplication de scénarios ne vienne obscurcir l'argumentation générale.

Enfin, les deux hypothèses retenues pour le prix des permis internationaux sont de 305 et 665 francs par tonne de carbone. Ces chiffres sont fixés par la moyenne des résultats des modèles représentés dans SAP12⁸³, dans le cas respectivement d'un commerce mondial des permis et d'un commerce limité à l'annexe B du protocole, et sous l'hypothèse simplificatrice d'un respect de bonne foi des engagements pris à Kyoto (cf. chap. I).

III.1. Définition des six variantes

La combinaison des degrés de liberté présentés dans la première partie permet d'envisager un grand nombre de scénarios, d'autant que rien n'oblige à traiter les différentes sources d'émission de la même manière. Les configurations retenues ne constituent donc qu'une sélection des combinaisons possibles (figure VII.1). Rappelons que dans un modèle déterministe comme IMACLIM, des permis vendus aux enchères équivalent à une taxe, et des permis gratuits à une combinaison d'une taxe et d'une subvention (cf. *supra*). Seule l'introduction d'une incertitude sur les coûts de réduction des émissions amènerait à différencier les instruments de régulation par les prix des instruments de régulation par les quantités (Weitzman 1974). Nous ne rappellerons pas systématiquement cette équivalence dans la suite du chapitre pour éviter de le surcharger.

⁸² Avec correction climatique pour 1990 et en excluant les émissions des transports internationaux, non couvertes par le protocole de Kyoto.

⁸³ La conversion des dollars 1990 en francs 1998 a été réalisée à l'aide des parités de pouvoir d'achat de l'OCDE et de l'indice des prix à la consommation de l'INSEE.

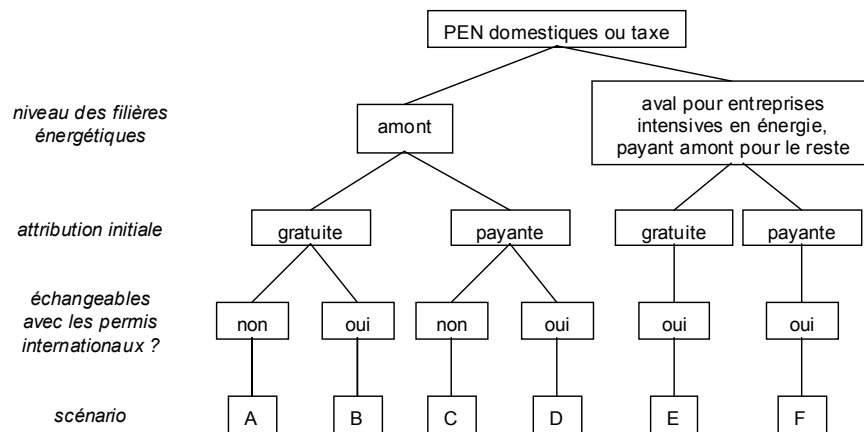


Figure VII.1 Définition des scénarios testés

- variante *A* : instauration de permis en amont distribués en *grandfathering*, non échangeables internationalement. La quantité de permis est égale à l'objectif de Kyoto;
- variante *B* : même variante assortie d'une possibilité d'accès aux permis internationaux. Le prix intérieur des permis s'établit donc au niveau du prix international et les émissions françaises au-delà du quota font l'objet d'une importation de permis. La comparaison entre les configurations A et B permet de mesurer l'effet pur de la flexibilité internationale;
- variante *C* : adoption d'une taxe-carbone au niveau adéquat pour le respect du quota de Kyoto. Ses revenus sont recyclés par une baisse des prélèvements obligatoires sur le travail salarié. Comparée à la configuration A, cette variante permet de cerner l'ampleur du deuxième dividende faible. En valeur absolue, elle donne l'ampleur du double dividende fort;
- variante *D* : instauration de permis en amont vendus aux enchères, échangeables internationalement. Le prix intérieur des permis s'établit donc là encore au niveau du prix international;
- variante *E*, première variante « d'aménagement » : les entreprises intensives en énergie (36% des émissions des entreprises, soit les branches U03, U04 et

T31⁸⁴) bénéficient de permis gratuits en aval, avec accès au marché international. Les autres activités de production, ainsi que les ménages, sont soumis à une taxe-carbone d'un taux nécessaire au respect de leur part du quota;

- variante *F*, seconde variante « d'aménagement » : même variante, mais les permis en aval sont vendus aux enchères et le produit de leur vente recyclé comme dans la variante *C*.

La comparaison systématique de ces six configurations se fera en centrant leur appréciation sur trois indicateurs : la consommation des ménages (hors énergie), l'emploi et la balance commerciale.

III.2. Variantes A et B : insuffisance de la flexibilité internationale

Le tableau VII.2 fait apparaître pour ces deux configurations des résultats systématiquement négatifs, confirmant ici les conclusions de l'analyse théorique. Sans recours aux marchés internationaux (variante *A*), le prix des permis domestiques s'établit à 799 F/tC. La consommation des ménages baisse (hors énergie) de 0,16% par rapport au scénario de base et s'accompagne d'une hausse significative du chômage (120 000 emplois perdus). Le mécanisme qui préside à ce résultat est mis en évidence par quelques indicateurs : en absence de recyclage de la « rente de rareté » par baisse du coût du travail, le prix du bien composite augmente; la baisse d'activité générale qui en résulte est renforcée par le recul du secteur énergétique et par l'augmentation de la facture énergétique des ménages (+4,5%), qui entraîne, à revenu constant, une moindre consommation de bien composite. Le seul indicateur positif est la légère amélioration de la balance commerciale (+0,4%), due au fait que le recul des exportations (conséquence directe de la hausse des prix) est plus que compensé par la réduction des importations d'hydrocarbures.

Ces effets sont certes atténués lorsque l'on autorise l'accès au marché international (variante *B*) : la consommation des ménages hors énergie est quasiment stabilisée (-0,08 à +0,04%), même si le recul de l'emploi reste sensible (de 55 000 à 104 000

⁸⁴ On envisage donc un aménagement étendu au-delà aux seules branches perdantes du bilan IV, considérant d'une part les pressions qui ne manqueraient pas d'apparaître s'il était trop restreint, d'autre part les limites de l'exercice de désagrégation sous-jacent.

emplois perdus), là encore du fait d'une baisse générale d'activité due à la hausse des prix de production. En revanche, les résultats sont moins positifs sur le solde extérieur : si une moindre hausse des prix modère la baisse des exportations de marchandises, cela ne suffit pas à compenser l'importation de PEN à hauteur de 1,3 à 2,6 milliards de francs.

III.3. Variantes C et D : existence d'un potentiel de double dividende

Les résultats de la variante C (tab. VII.3) rejoignent ceux présentés au chapitre VI, et confirment l'existence d'un potentiel de double dividende fort des politiques climatiques en cas d'utilisation des marges de manœuvre fiscales. L'augmentation de la consommation des ménages s'élève à 0,39% et les créations d'emploi à 218 000. La taxe carbone nécessaire pour un tel résultat est notablement supérieure au coût marginal d'abattement de la configuration A (1023 FF/tC contre 799). Ceci s'explique par un accroissement du niveau d'activité et donc l'entrée, pour les hypothèses de réactivité du système énergétique retenues, dans une zone où les coûts techniques de réduction des émissions sont fortement croissants.

Techniquement, la principale cause de l'obtention d'un deuxième dividende significatif (une hausse de la consommation hors énergie de 0,55 points par rapport à la variante A) est la baisse du prix du bien composite déclenchée par l'allègement de la charge fiscale pesant sur la production. Cette baisse permet une amélioration de la compétitivité générale—qui masque l'effet négatif enregistré par les IGCE, cf. bilan IV ci-dessus—mais surtout une hausse de la demande finale des ménages à revenu monétaire constant. Le résultat est encore meilleur pour l'emploi, puisqu'à volume d'activité égal, les entreprises optent pour des « technologies » plus intensives en travail⁸⁵ et, à niveau de revenu nominal donné, les ménages voient leur pouvoir d'achat réel augmenter.

⁸⁵ À ce niveau d'agrégation, ainsi que nous l'avons évoqué précédemment, ce déplacement capte à la fois des choix techniques plus intensifs en travail mais aussi des transformations dans la structure interne du « bien composite » (agrégat macro-économique) avec baisse de la part relative des biens intensifs en carbone.

La variante *D* présente un deuxième dividende plus modéré, le prix domestique des permis s'alignant sur le prix international, et le potentiel mis en lumière par la variante *C* n'étant en conséquence que partiellement exploité. Point d'importance, l'amélioration du solde extérieur fait place à une stabilisation, en raison d'une moindre réduction des importations d'énergie fossile et d'une hausse des importations de permis d'émission (1,6 à 2,7 milliards de francs).

	A	B	
Prix international des PEN (F/tC)		665,00	305,00
Prix national des PEN/taux de taxe (F/tC)	798,81		
Indice de prix à la production	0,33%	0,26%	0,08%
Facture énergétique des ménages	4,45%	3,16%	0,55%
Consommation finale des ménages, hors énergie	-0,16%	-0,08%	0,04%
Importation de PEN, MF	0	-1 328	-2 626
Évolution du solde extérieur (*)	0,40%	0,33%	0,14%
Emplois créés	-120 456	-104 094	-55 194

En pourcentage par rapport au compte de référence, sauf () pourcentage du PIB de référence.*

Tableau VII.2 Variantes A et B : permis distribués en amont en grandfathering

	C	D	
Prix international des PEN (F/tC)		665,00	305,00
Prix national des PEN/taux de taxe (F/tC)	1 023,00	600,00	600,00
Indice de prix à la production	-0,65%	-0,95%	-0,41%
Facture énergétique des ménages	4,47%	2,20%	0,14%
Consommation finale des ménages, hors énergie	0,39%	0,16%	0,11%
Importation de PEN, MF		-1 578	-2 681
Évolution du solde extérieur (*)	0,05%	0,17%	0,07%
Emplois créés	217 862	14 879	-3 952

En pourcentage par rapport au compte de référence, sauf () pourcentage du PIB de référence.*

Tableau VII.3 Variantes C et D : permis aux enchères ou taxe générale, en amont

III.4. Variantes E et F : deuxième dividende et rétrécissement de la base fiscale

Les résultats de la variante *E* (tab. VII.4), malgré un rétrécissement de 36% de la base fiscale théorique, font apparaître une augmentation de la consommation des ménages de même ordre de grandeur que dans la variante *C*. Certes, on constate une baisse significative de l'impact sur l'emploi, mais celui-ci reste très favorable : 149 000 ou 173 000 emplois créés (selon le prix des PEN) contre 218 000.

Ces résultats, au premier abord contre-intuitifs, s'expliquent en comparant de façon systématique les différents résultats des scénarios *C* et *E*. Le problème central est de comprendre pourquoi un rétrécissement de l'assiette sur laquelle est prélevée la taxe carbone ne se traduit pas par une baisse proportionnelle du double dividende et de l'emploi.

Ce rétrécissement entraîne bien, *coeteris paribus*, une moindre baisse des prélèvements obligatoires sur le travail, d'où une moindre augmentation de l'intensité en travail de la production. C'est encore plus vrai concernant les industries intensives en carbone : la hausse des prix relatifs de l'énergie par rapport au travail qu'elles subissent est modérée par l'accès à un prix international du carbone nettement inférieur à celui qu'induit la taxe nationale.

Cependant ce mécanisme est en grande partie compensé par le fait que la baisse des prix de production du bien composite reste du même ordre de grandeur dans les deux scénarios (0,56 ou 0,71% contre 0,65%). En effet, le scénario *E* amène, par rapport au *C*, un transfert de pression fiscale des entreprises (en l'occurrence celles intensives en énergie) vers les ménages. Du coup, les revenus non salariaux des ménages (dont les transferts et les rentes d'oligopole qui proviennent de la concurrence imparfaite sur le marché des biens) sont davantage taxés, ce qui réduit la pression fiscale sur les revenus salariaux. Aussi, l'incitation à l'activité croît, d'où un maintien de l'essentiel du double dividende. Cet effet contrebalance la moins bonne allocation des réductions d'émission au sein de l'économie, due à la différence de coût marginal de réduction entre les industries intensives en énergie et les autres.

En d'autres termes, on retrouve bien ici, au niveau empirique, le résultat théorique selon lequel le coût économique d'une réforme fiscale environnementale est d'autant plus faible, et l'effet sur l'emploi d'autant plus favorable, que la nouvelle taxe porte sur les revenus non salariaux (cf. chap. II). C'est en effet de cette manière qu'on peut

interpréter un passage du scénario *C* au scénario *E*. La synthèse des travaux théoriques réalisée par Chiroleu-Assouline (2001) indique que ce résultat semble robuste à la spécification retenue pour le marché du travail (négociations salariales ou salaire d'efficience, avec différents modes de détermination des allocations chômage).

Cette analyse est confirmée par le scénario *F*, qui en quelque sorte combine les points forts des scénarios *C* (collectiviser la rente de rareté même dans les industries intensives en énergie) et *E* (transférer une part des efforts de réduction des entreprises vers les ménages). Ceci explique qu'on obtienne des résultats légèrement plus élevés, en terme d'emploi et de consommation du bien composite, que dans le scénario *C*, en tout cas dans le cas où le prix international des permis s'établit à 665 F/tC.

	E		F	
Prix international des PEN (F/tC)	665,00	305,00	665,00	305,00
Prix national des PEN/taux de taxe (F/tC)	884,99	1004,08	971,67	964,56
Indice de prix à la production	-0,56%	-0,71%	-0,85%	-0,81%
Facture énergétique des ménages	4,08%	4,46%	4,63%	4,10%
Consommation finale des ménages, hors énergie	0,38%	0,38%	0,55%	0,44%
Importation de PEN, MF	-1 022,94	-469,17	-580,97	-606,58
Évolution du solde extérieur (*)	0,05	0,03	-0,01%	0,00
Emplois créés	149 321	172 969	236 363	198 347

En pourcentage par rapport au compte de référence, sauf () pourcentage du PIB de référence.*

Tableau VII.4 Variantes E et F : taxation en amont, permis en aval échangeables internationalement

Conclusion

Les résultats qui précèdent tendent à démontrer que l'usage de permis d'émission négociables internationaux, loin d'être contradictoire avec la perspective d'un double-dividende de réformes fiscales écologiques, pourrait le faciliter en réduisant l'obstacle que constituent les risques de distorsion de concurrence pour les industries intensives en carbone. Le point central de l'argument est que la réduction de la base fiscale par

retrait des industries grosses consommatrices d'énergie (IGCE) ne supprime qu'une petite partie du second dividende théorique d'une taxe carbone générale.

Ceci ne signifie pas que le marché international du carbone suffise à régler les problèmes de distorsion de concurrence. Il convient en effet de tenir compte des singularités des systèmes fiscaux préexistants, mais surtout de l'impact des règles de rétrocession des PEN par les gouvernements aux différents secteurs des permis d'émission. La littérature sur les permis négociables utilise en effet de façon souvent fautive le théorème de Coase concernant la séparabilité entre équité et efficacité. La clef d'allocation initiale des permis entre pays n'introduit certes pas de distorsion de concurrence *via* la formation des coûts, puisque le prix des permis est unique, mais ceci ne signifie nullement qu'elle est neutre vis-à-vis de la compétitivité et du « bien-être » des différents pays.

La majorité des problèmes serait évitée si les pouvoirs publics rétrocédaient aux enchères des permis qui pourraient ensuite être cédés internationalement. On a vu que ceci revient (en univers certain) à une taxe dont le niveau est dicté par le prix international du carbone, et que les performances macroéconomiques d'ensemble s'en trouvent notablement améliorées. Cependant, une telle mesure pose toujours, pour les IGCE la difficulté d'un paiement dès la première tonne rejetée⁸⁶.

Or le principe alternatif de « *grandfathering* » n'a aucune justification économique et n'a pu être appliqué dans d'autres dossiers (comme le dioxyde de soufre aux États-Unis) que du fait de l'homogénéité des secteurs concernés. Dans le cas des gaz à effet de serre, il pose des problèmes spécifiques puisqu'on se trouve en présence de secteurs fort hétérogènes à la fois du point de vue technologique et du point de vue des perspectives de croissance. Dans un contexte international de forte compétitivité commerciale, ces considérations ouvrent la voie à des manipulations stratégiques où l'allocation des quotas peut devenir une subvention implicite à tel ou tel secteur. La distorsion résultante ne provient pas du niveau des « prix du carbone » répercuté dans les prix des produits, mais du fait que, dès lors que les décisions d'investissement des entreprises sont influencées par leurs conditions financières (Rosenwald 2001) les firmes ayant reçu une dotation généreuse pourront utiliser la rente qui leur est concédée pour investir davantage que leurs concurrentes.

⁸⁶ Et peut-être même encore plus qu'une taxe, qui offre au moins l'avantage, pour les entreprises, d'apporter une certitude sur le coût marginal de réduction des émissions.

En définitive, l'idéal serait sans doute l'harmonisation internationale des modes de rétrocession aux entreprises, et, au cas où cette harmonisation ne peut être accomplie de manière satisfaisante, la garantie que des ajustements aux frontières pourront être opérés si les pratiques de tel ou tel pays reviennent à des subventions implicites à certains secteurs industriels (Hoel 1996).

Chapitre VIII

**Impact des structures de
production :**

**simulations sur 8
économies**

Introduction

Ce chapitre reprend des éléments d'une étude menée conjointement par le CIRED, l'IEPE et le CEPII, concernant l'évaluation de trois règles mondiales de distribution d'un même quota mondial d'émissions de GES⁸⁷ à l'horizon 2030 :

- **contraction et convergence**, une règle imaginée par le *Global Common Institute*, prévoit une convergence sur l'ensemble des zones géographiques distinguées des émissions par tête, puis une contraction globale de ces émissions par tête. Ces travaux retiennent 2050 pour date de convergence,
- « *soft landing* », une règle développée par l'IEPE, consiste en un maintien d'un système de type Kyoto (engagements proportionnels aux émissions réelles en 1990) pour les pays industrialisés, et en un freinage progressif des émissions des pays en développement,
- **compromis global**, une règle proposée par Müller et Bartsch (2000) propose un compromis entre l'approche par *grandfathering* (de type Kyoto) et l'égalisation des émissions par tête.

L'analyse de chacune de ces règles a pu être menée conjointement par les trois instituts grâce au couplage des modèles IMACLIM et POLES, selon les modalités décrites chap. V et annexes IV.1 et 2, sur la base d'un même jeu de projections de croissance du PIB et de la productivité réalisé par le CEPII. La désagrégation mondiale retenue dans les simulations produites par IMACLIM considère à l'origine 14 zones; la présentation des résultats des huit zones les moins agrégées suffira à l'illustration du propos de ce chapitre.

Comme dans le cas des comparaisons présentées en clôture du chapitre V, un premier jeu d'analyse est développé pour chaque zone, en faisant l'hypothèse d'une rétrocession gratuite des quotas de chaque zone aux émetteurs de carbone⁸⁸; un second jeu d'analyses intègre l'hypothèse que la rétrocession des quotas se faisait aux enchères

⁸⁷ Pour information, un peu moins de 10 GtC d'émissions de CO₂ d'origine énergétique (hors prise en compte des émissions dues à l'agriculture).

⁸⁸ Dans le cadre d'IMACLIM, cette hypothèse est traduite par l'introduction d'un coût marginal de réduction au niveau des prix de production de l'énergie, sans modification du système fiscal.

(ou plus simplement qu'une taxe est appliquée à l'ensemble des émissions de carbone), et que les sommes prélevées sont recyclées dans une diminution des charges sociales.

Enfin, une hypothèse de marché international est testée, avec rétrocession gratuite de quotas. Il est clair qu'en théorie, le comportement optimum des États serait de conserver le monopole du commerce international de carbone et de procéder en interne aux politiques fiscales maximisant le double dividende (cf. chap. précédent), mais les pressions probables du secteur industriel pour une égalisation des conditions de concurrence, et la crainte de voir les États s'approprier le monopole de ce nouveau commerce—considérant les utilisations stratégiques qu'ils pourraient en faire—peuvent justifier l'hypothèse d'une distribution gratuite aux agents. Cette hypothèse est plus proche aussi des résultats de POLES, ce qui rend plus intéressante la comparaison des équilibres partiel et général.

Nous suivons pour l'exposé des résultats une logique par zones facilitant la lisibilité de plus amples développements. En propos liminaire à cette présentation par zones nous proposons un complément à la comparaison des résultats obtenus en équilibre sectoriel et en équilibre général présentée en clôture du chapitre V.

I. Résultats des scénarios

Les tableaux pages suivantes donnent pour les huit zones ou pays retenus et les trois règles d'attribution de quotas :

- les coûts marginaux de la contrainte carbone, en dollars 1995 par tonne, en équilibre sectoriel (CM_S) et général (CM_{EG}),
- les coûts totaux de cette contrainte, évalués pour POLES en pourcentage du PIB de référence (projection hors contrainte carbone à 2030), et pour IMACLIM selon l'évolution de la consommation des ménages constatée⁸⁹ (cf. chap. IV et VI),

⁸⁹ Selon les considérations sur les mesures de coût développées au chapitre IV. On aurait pu proposer une évolution du PIB plus directement comparable aux résultats de POLES, mais on a préféré délivrer l'indicateur le plus significatif du coût total, qui est aussi celui principalement utilisé pour la qualification du second dividende aux chapitres VI et VII.

selon que les quotas sont rétrocédés gratuitement sans (*G*) ou avec (*GM*) marché international, ou aux enchères (*E*) en l'absence de marché international.

	Union Européenne			
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	625	197	0,66	-1,85 %
<i>CC(E)</i>	625	402	0,66	+2,00 %
<i>CC(GM)</i>	106	42	0,16	-0,22 %
<i>SL(G)</i>	285	106	0,24	-0,61 %
<i>SL(E)</i>	285	224	0,24	+2,18 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	0,09	-0,15 %
<i>CG(G)</i>	241	93	0,19	-0,47 %
<i>CG(E)</i>	241	196	0,19	+2,10 %
<i>CG(GM)</i>	106	42	0,08	-0,14 %

	États Unis			
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	822	319	1,83	-7,38 %
<i>CC(E)</i>	822	406	1,83	-5,38 %
<i>CC(GM)</i>	106	42	0,64	-0,75 %
<i>SL(G)</i>	248	111	0,46	-1,49 %
<i>SL(E)</i>	248	149	0,46	-0,04 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	0,34	-0,57 %
<i>CG(G)</i>	535	216	1,09	-2,91 %
<i>CG(E)</i>	535	284	1,09	-0,98 %
<i>CG(GM)</i>	106	42	0,52	-0,68 %

Japon				
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	850	382	0,98	-6,22 %
<i>CC(E)</i>	850	654	0,98	-2,96 %
<i>CC(GM)</i>	106	42	0,26	-0,56 %
<i>SL(G)</i>	365	204	0,24	-2,13 %
<i>SL(E)</i>	365	355	0,24	-0,11 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	0,13	-0,51 %
<i>CG(G)</i>	383	214	0,26	-2,26 %
<i>CG(E)</i>	383	372	0,26	-0,16 %
<i>CG(GM)</i>	106	42	0,13	-0,51 %

Canada, Océanie				
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	768	406	1,49	-2,67 %
<i>CC(E)</i>	768	458	1,49	+0,04 %
<i>CC(GM)</i>	106	42	0,57	-0,57 %
<i>SL(G)</i>	291	186	0,53	-0,91 %
<i>SL(E)</i>	291	206	0,53	+0,99 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	0,37	-0,40 %
<i>CG(G)</i>	546	303	1,03	-1,84 %
<i>CG(E)</i>	546	340	1,03	+0,53 %
<i>CG(GM)</i>	106	42	0,50	-0,51 %

Ancienne URSS				
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	394	86	1,64	-8,19 %
<i>CC(E)</i>	394	168	1,64	+1,24 %
<i>CC(GM)</i>	106	42	0,96	-4,65 %
<i>SL(G)</i>	16	5	0,01	-1,19 %
<i>SL(E)</i>	16	7	0,01	-0,45 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	-0,26	-1,00 %
<i>CG(G)</i>	529	108	2,38	-10,50 %
<i>CG(E)</i>	529	204	2,38	-0,39 %
<i>CG(GM)</i>	106	42	1,13	-5,01 %

	Chine			
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	99	34	0,15	-1,33 %
<i>CC(E)</i>	99	63	0,15	+1,18 %
<i>CC(GM)</i>	106	42	0,15	-1,18 %
<i>SL(G)</i>	37	14	0,03	-0,50 %
<i>SL(E)</i>	37	25	0,03	+0,83 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	-0,05	+0,49 %
<i>CG(G)</i>	91	32	0,13	-1,22 %
<i>CG(E)</i>	91	59	0,13	+1,19 %
<i>CG(GM)</i>	106	42	0,12	-0,99 %

	Inde			
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	-	-	-	-
<i>CC(E)</i>	-	-	-	-
<i>CC(GM)</i>	106	42	-0,40	+0,88 %
<i>SL(G)</i>	75	19	0,08	-1,80 %
<i>SL(E)</i>	75	38	0,08	+0,67 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	0,07	-1,51 %
<i>CG(G)</i>	-	-	-	-
<i>CG(E)</i>	-	-	-	-
<i>CG(GM)</i>	106	42	-0,36	+0,71 %

	Brésil			
	CM_S	CM_{EG}	Effort, % PIB (POLES)	Consommation (IMACLIM)
<i>CC(G)</i>	-	-	-	-
<i>CC(E)</i>	-	-	-	-
<i>CC(GM)</i>	106	42	-0,08	+0,02 %
<i>SL(G)</i>	238	105	0,18	-0,65 %
<i>SL(E)</i>	238	142	0,18	+0,77 %
<i>SL(GM)</i>	106	42	0,13	-0,33 %
<i>CG(G)</i>	-	-	-	-
<i>CG(E)</i>	-	-	-	-
<i>CG(GM)</i>	106	42	-0,07	+0,02 %

II. Comparaison des équilibres sectoriel et général : résultats transversaux

II.1. Comparaison des coûts marginaux

La comparaison des coûts marginaux calculés par les deux exercices de modélisation débouche sur des conclusions d'ensemble similaires à celles développées dans le cas de l'Union Européenne au chapitre V.

En premier lieu, dans l'hypothèse d'une distribution gratuite des permis, on réobserve que la prise en compte en équilibre général de la répercussion de l'effet prix par le système de formation des coûts de production amplifie considérablement le signal prix de premier ordre tel qu'il est considéré par POLES, en conséquence de quoi les estimations de coût marginal d'IMACLIM sont pour un même objectif très inférieures à celles de POLES.

Les comparaisons permises par l'extension des simulations à plusieurs zones géographiques permettent cependant de mieux cerner en quoi les structures de production influencent ce mécanisme. Le tableau VIII.1 révèle en effet que pour un même signal prix (les 42\$/tC qui équilibrent le marché mondial selon IMACLIM⁹⁰) les hausses du prix intermédiaire de l'énergie varient du simple à près du triple selon les zones :

⁹⁰ Quelle que soit la règle d'attribution de quota considérée, puisque le quota mondial est le même dans les trois cas.

	Hausse « POLES » ⁹¹	Hausse IMACLIM
Union Européenne	+6,7%	+7,9%
États-Unis	+9,7%	+16,3%
Japon	+4,1%	+7,9%
Canada, Océanie	+5,6%	+10,0%
Ancienne URSS	+5,4%	+15,7%
Chine	+15,2%	+23,8%
Inde	+20,2%	+29,4%
Brésil	+4,8%	+7,0%

**Tableau VIII.1 Effet du bouclage macroéconomique
sur la hausse des prix de l'énergie**

De façon très compréhensible, on remarque que l'amplification du signal est d'autant plus forte que la part du coût de l'énergie dans la formation des coûts de production est grande (cf. tab. VIII.2 ci-dessous).

En cas de mise aux enchères du quota les résultats sur huit zones demeurent unanimement plus optimistes en équilibre général qu'en équilibre partiel, quelle que soit la règle d'allocation : l'effet déflationniste de la baisse des charges sur le travail ne compense pas l'effet du signal prix au point de requérir son augmentation. Concernant la structure des différentes économies, on observe une corrélation entre l'ampleur du gain en efficacité que constitue la mise aux enchères et le recyclage—soit que l'économie est très intensive en énergie, comme pour l'ancienne URSS, soit que les taxations sur le travail sont fortement distorsives, comme pour l'Union Européenne—et son effet inflationniste sur le niveau de contrainte requis; ceci n'est pas sans influence sur les termes de l'arbitrage pour les différentes zones entre minimisation des coûts marginaux apparents et minimisation du coût en bien-être total(cf. les considérations de politique économique développées au premier chapitre).

⁹¹ Ou plus exactement hausse telle qu'elle aurait été prise en compte par POLES pour le prix international d'équilibre calculé par IMACLIM, évaluée dans IMACLIM en appliquant le signal-prix au prix intermédiaire de l'énergie de référence, sans bouclage sur les autres prix (du bien composite, de l'investissement, etc.).

II.2. Comparaison des coûts totaux

En cas de rétrocession gratuite, les estimations de coûts totaux d'IMACLIM sont plus fortes que celles de POLES. Il est important de souligner que la nature foncièrement différente des deux indicateurs limite la portée de leur comparaison : POLES procède à l'évaluation des coûts totaux par intégration sous les courbes de coûts marginaux, et rapport au PIB, donc sur la base de deux grandeurs nominales; IMACLIM fait appel à la variation de consommation des ménages, grandeur réelle dont les fluctuations s'expliquent majoritairement par le phénomène d'inflation par bouclage des prix en équilibre général, tel que décrit plus haut.

On peut malgré tout remarquer que les résultats d'équilibre général apparaissent plus pessimistes que les résultats sectoriels. Pessimisme qu'il convient de relativiser, en gardant à l'esprit que la baisse la plus extrême en 2030, 10,5% (ancienne URSS, CG-G), correspond à une baisse de 0,37 points du taux de croissance de cette consommation entre 2003 et 2030, soit un taux moyen annuel de 1,77% au lieu des 2,14% de la projection de référence du CEPII ; pour l'Union Européenne le scénario le plus négatif (CC-G, -1,85%), correspond à une perte de 0,00068 points du taux annuel.

Ce constat est renversé en cas de mise aux enchères des quotas : pour la majorité des zones, IMACLIM calcule que le recyclage des revenus permet une croissance de la consommation, soit un second dividende selon la définition retenue au chap. VI. Les résultats par zone présentés ci-dessous détaillent l'ampleur de ce dividende (ou du moins de la baisse des pertes en consommation) selon les économies.

Au total, les comparaisons des évaluations de coûts marginaux et totaux permettent d'établir que la prise en compte des mécanismes macroéconomiques introduit un degré d'optimisme dans l'étude des impacts des différents scénarios, en matière de coûts marginaux comme en matière de coûts totaux dès lors que sont pleinement utilisées les marges de manœuvres fiscales dérivées de l'instauration d'un nouveau prélèvement.

III. Résultats par zone

Les clés du commentaire par zone sont livrées dans les tableaux VIII.2 et VIII.3, qui synthétisent les deux dimensions explicatives du coût d'un quota d'émissions donné :

- les structure des économies et les réactivité de leurs systèmes énergétiques, soit une information corrélée à la forme de leurs courbes de coût d'abattement implicites;
- les niveaux d'efforts exigés de chacune des zones, dépendant des projections de référence (hors contrainte carbone) ainsi que des niveaux absolus de quotas qui leur ont été alloués.

		Union Europ	États Unis	Japon	Canada, Océanie	Ex URSS	Chine	Inde	Brésil
Référence 2030	Part des dépenses d'énergie sur la dépense des ménages	3,9%	2,2%	1,6%	2,3%	15,3%	1,6%	1,6%	1,6%
	Part du coût de l'énergie dans le coût total, bien composite	2,3%	1,5%	2,4%	2,1%	15,6%	6,3%	6,9%	2,0%
	Ratio coût de l'énergie/coût du travail, bien composite	0,056	0,036	0,064	0,055	0,689	0,275	0,280	0,099
Réactivité du système énergétique correspondant (calculs POLES)	Baisse des consommations intermédiaires, \$100/tC	-12%	-21%	-4%	-20%	-18%	-21%	-17%	-9%
	Baisse des consommations intermédiaires, \$600/tC	-35%	-47%	-16%	-43%	-41%	-53%	-49%	-31%
	Décarbonisation de la cons. intermédiaire, \$100/tC	-5%	-11%	-4%	-12%	-4%	-6%	-6%	-3%
	Décarbonisation de la cons. intermédiaire, \$600/tC	-16%	-29%	-14%	-32%	-11%	-24%	-24%	-13%
	Baisse de la consommation finale, \$100/tC	-4%	-9%	-2%	-6%	-6%	-15%	-11%	-3%
	Baisse de la consommation finale, \$600/tC	-17%	-28%	-11%	-23%	-20%	-40%	-32%	-11%
	Décarbonisation de la consommation finale, \$100/tC	0,2%	1%	-3%	-1%	-2%	-6%	-2%	-4%
	Décarbonisation de la consommation finale, \$600/tC	-7%	-8%	-10%	-12%	-10%	-28%	-18%	-16%

**Tableau VIII.2 Structures projetées des économies
et réactivité de leurs systèmes énergétiques**

	<i>Contraction et Convergence</i>	<i>Soft Landing</i>	<i>Compromis Global</i>
Union Européenne	42%	29%	26%
États-Unis	63%	41%	54%
Japon	39%	22%	23%
Canada, Océanie	59%	43%	53%
Ancienne URSS	38%	3%	42%
Chine	26%	11%	24%
Inde	-14%	16%	-12%
Brésil	-3%	20%	-3%

**Tableau VIII.3 Réductions d'émissions requises en 2030
selon les scénarios**

III.1. Union Européenne, États-Unis, Japon, Canada et Océanie

Il est frappant de constater que, dans l'hypothèse de quotas rétrocédés gratuitement, les préférences des quatre zones sont les mêmes selon IMACLIM et POLES, que ce soit en matière de coûts totaux ou de coûts marginaux. Avec ou sans marché international elles suivent très exactement la hiérarchie des efforts requis telle que rapportée dans le tableau VIII.3 : le scénario *Contraction et Convergence* est unanimement le plus néfaste; le scénario *Soft Landing* est le plus favorable, à l'exception de l'Union Européenne pour qui il est très légèrement plus pénalisant (0,05 points de PIB, 0,14 points de consommation) que le scénario *Compromis Global*.

Concernant les niveaux absolus de coûts totaux atteints, une double comparaison s'impose :

- États-Unis/Canada et Océanie : à quotas comparables POLES calcule des taux d'effort comparables, tandis qu'IMACLIM donne des évolutions de consommation des ménages nettement plus divergentes, en défaveur des États-Unis; cette divergence est due aux fiscalités préexistantes sur l'énergie : elles sont trois fois moins élevées aux États-Unis, et en conséquence un coût marginal moindre entraîne une hausse beaucoup plus marquée du coût de l'énergie.

- Union Européenne/Japon : à contrainte relative comparable, voire plus lâche pour le Japon, POLES calcule des baisses de croissance moins divergentes que les baisses de consommation d'IMACLIM. Ceci est principalement dû à l'inertie comparative du système énergétique japonais, qui rend nécessaire des niveaux de coûts marginaux plus élevés, dont l'impact est amplifié en équilibre général par le bouclage des prix.

En conséquence, la mise aux enchères des quotas permet l'apparition d'un double dividende fort pour l'Union Européenne et l'agrégat Canada-Océanie, mais ne fait que diminuer, certes substantiellement, les pertes enregistrées par les États-Unis et le Japon. Les gains relatifs en comparaison des distributions gratuites sont plus forts, à contrainte équivalente, pour l'Union Européenne et le Japon, en raison de fiscalités sur le travail nettement plus distorsives.

Outre ces distinctions, la sollicitation des marges de manœuvre macroéconomiques ne modifie quasiment pas l'ordre des préférences entre scénarios constaté sous l'hypothèse d'une rétrocession gratuite. La seule exception est l'Union Européenne : le scénario *Soft Landing* devient pour elle plus attractif que le scénario *Compromis Global*, bien qu'il lui alloue un quota plus contraignant. Ce basculement est dû à une structure fiscale préexistante particulièrement distorsive d'une part, d'autre part aux réactivités relativement plus faibles du système énergétique, qui garantissent au recyclage une base fiscale relativement stable, si bien que le second dividende augmente encore au-delà du prix de *Compromis Global* pour être le plus fort dans le scénario *Soft Landing*.

III.2. Ancienne URSS

Comme pour les zones qui précèdent, en cas de distribution gratuite les préférences de la zone ex-URSS suivent fidèlement la hiérarchie des quotas qui lui sont alloués (tableau VIII.3), avec ou sans marché international, pour les deux exercices de modélisation et les deux types d'indicateur : le scénario *Soft Landing* conduit à des coûts nettement inférieurs à ceux des deux autres scénarios. Les coûts totaux enregistrés en *Contraction et Convergence* et en *Compromis Global*, avec ou sans marché, sont les plus élevés parmi les neuf zones, en PIB comme en consommation. Ceci s'explique en partie du fait des quotas imposés, en particulier en *Compromis Global*, mais aussi et surtout du fait de la structure projetée de l'économie ex-soviétique : l'énergie y a un poids très supérieur à ce qu'il est pour l'ensemble des

autres zones, que ce soit en termes de consommation finale ou de consommation intermédiaire⁹².

En revanche, contrairement au résultat obtenu pour les quatre zones les plus développées, IMACLIM fait apparaître que le recyclage du revenu d'une mise aux enchères bouleverse profondément les préférences entre scénarios : le *Compromis Global*, pourtant fortement contraignant, permet en dernière analyse un gain net de consommation des ménages qui n'apparaît pas en *Soft Landing*. Les mécanismes de double dividende jouent manifestement à plein : le poids relatif de l'énergie, qui expliquait pourquoi une distribution gratuite est si néfaste dans les deux scénarios *Contraction et Convergence* et *Compromis Global*, rend particulièrement efficace le transfert de charge fiscale du travail vers l'énergie. On notera par ailleurs l'évolution du second dividende en fonction du coût marginal : il n'apparaît pas encore pour un coût faible, semble jouer à plein à 168\$/tC, mais a déjà disparu à 204\$/tC.

III.3. Chine

En distribution gratuite, avec ou sans marché international, POLES comme IMACLIM donnent à nouveau des indicateurs de coûts marginaux et totaux qui révèlent des préférences calquées sur le niveau de la contrainte supportée dans chacun des scénarios.

Comme pour l'ancienne URSS, le recyclage des gains d'une mise aux enchères modifie l'ordre des préférences chinoises, le second dividende étant supérieur en *Contraction et Convergence* à ce qu'il est en *Soft Landing*, malgré une contrainte plus forte. On retrouve aussi le résultat ex-soviétique d'une décroissance du second dividende entre la contrainte carbone intermédiaire (*Compromis Global*) et la contrainte carbone la plus élevée (*Contraction et Convergence*) : les asymptotes implicites dans la réactivité des

⁹² La projection du TES de cette zone a nécessité des ajustements techniques, et on ne peut donc lui accorder une validité équivalente à celle des autres zones. Toutefois les chiffres des trois indicateurs de structure du tableau VIII.2 en l'année de base, 1995, respectivement 10%, 10% et 0,332, ainsi que les hausses de prix envisagées par POLES dans son scénario de référence (+307%), sont tout à fait compatibles avec les projections obtenues par ajustement, si bien que, comme nous le soulignons précédemment, les résultats cités, dans leur ordre de grandeur, suggèrent des mécanismes liés aux caractéristiques de cette zone, et sur lesquels des recherches plus fines devront faire la clarté.

systèmes énergétiques provoquent des hausses de prix croissantes qui finissent par grever l'équilibre d'ensemble au-delà du gain qu'entraîne la baisse des coûts du travail.

III.4. Inde et Brésil

Ne subissant une contrainte réelle que dans le seul scénario *Soft Landing*, l'Inde et le Brésil ne sont concernés par les deux autres scénarios que sous l'hypothèse de la mise en place d'un marché international. Soulignons que le gain net que les deux pays en retirent n'a pas été obtenu par un recyclage dans une baisse des coûts du travail : la logique microéconomique, qui provoque l'adoption interne d'un coût marginal d'abattement du carbone égal au prix mondial, conduit sous l'hypothèse de quotas gratuits à une baisse de la consommation des ménages. Il est dès lors probable que ces pays se gardent d'adopter un tel dispositif et découplent au moins partiellement leur prix intérieur du carbone du prix mondial. Néanmoins, pour rester homogène avec les simulations des autres régions on a considéré que, plutôt que d'être rétrocédés aux consommateurs, les revenus de l'échanges seraient affectés à une augmentation des investissements productifs (il s'agit bien d'un transfert financier externe en partie gratuit), avec pour conséquence les gains nets de consommation finale affichés.

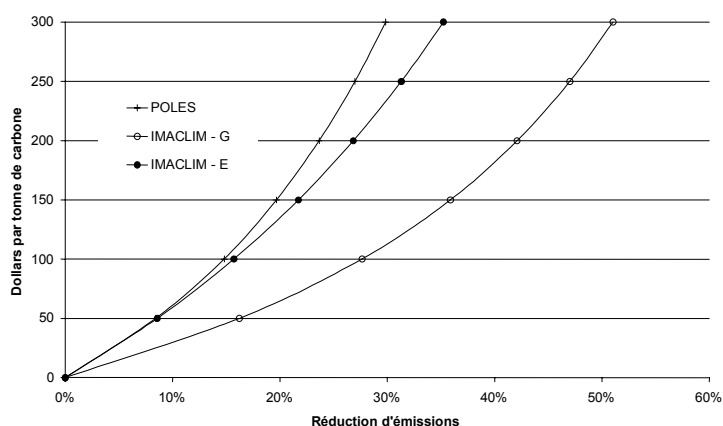
En scénario *Soft Landing* et en cas de rétrocession gratuite, IMACLIM modifie les conclusions de POLES concernant l'effort total des deux zones : l'Inde, malgré une contrainte moins forte, affiche des pertes de consommation plus élevées que celles du Brésil. L'explication de cette divergence réside dans le poids supérieur de la consommation intermédiaire d'énergie en Inde.

Conclusion

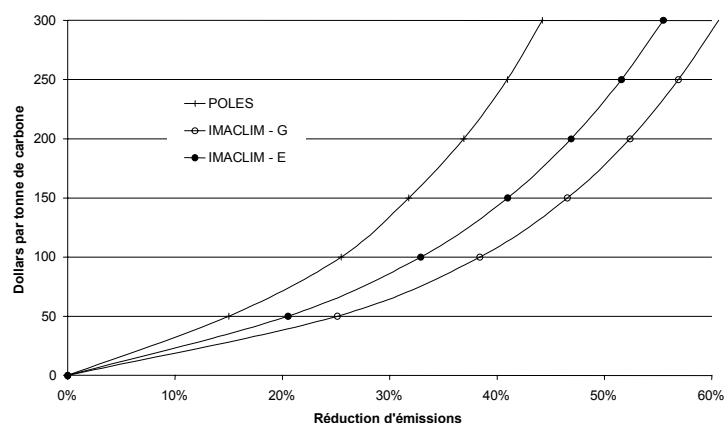
Dans la ligne des considérations développées aux chapitres III et V, les résultats délivrés pour huit économies différentes par l'architecture IMACLIM-POLES, mise en cohérence par l'utilisation d'hypothèses de croissance communes, confirment l'intérêt d'un couplage maîtrisé entre modèles sectoriels et modèles d'équilibre général : selon les modalités d'application des politiques climatiques envisagées et les structures initiales des économies, les coûts marginaux et totaux (apparents) d'une contrainte carbone à contrainte donnée peuvent varier très sensiblement.

Pour illustrer de manière forte cette conclusion dans le cas plus éloquent de l'estimation de coût marginal, on présente trois graphiques pour les trois zones les plus développées, aux structures économiques très divergentes, selon que l'on considère les résultats de l'étude sectorielle (POLES), de l'étude en équilibre général avec rétrocession des quotas gratuite (IMACLIM-G) ou de l'étude en équilibre général avec rétrocession des quotas aux enchères (IMACLIM-E). On peut ainsi embrasser en un regard :

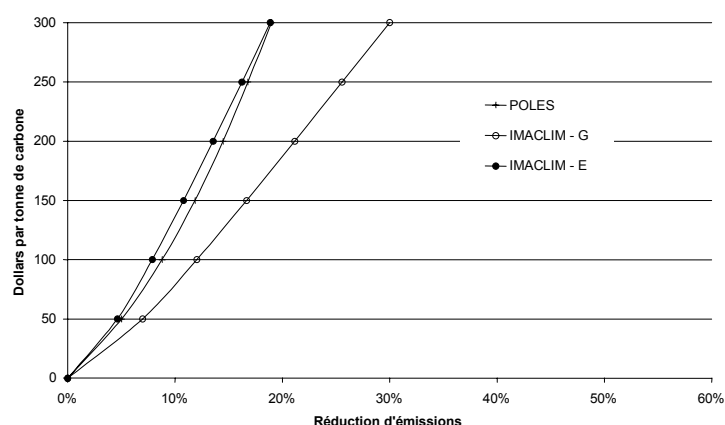
- dans la verticalité générale des courbes pour chaque économie (les échelles ont été volontairement harmonisées), leur efficacité énergétique relative;
- dans l'écart relatif entre courbes POLES et IMACLIM-G, l'importance des coûts énergétiques dans la formation des coûts de production;
- dans celui entre courbes IMACLIM-G et -E, le degré de distorsion de la fiscalité sur le travail en place (les taux sont ceux de 1995).



Graphique VIII.1 CCMA 2030 - Union Européenne



Graphique VIII.2 CCMA 2030 - États-Unis



Graphique VIII.3 CCMA 2030 - Japon

Soulignons que si les résultats obtenus pour les pays ou les zones économiquement intégrées sont aisément interprétables; ce n'est pas le cas pour les zones correspondant à des économies aujourd'hui instables (ex-URSS), ou encore pour les zones correspondant à des agrégations masquant des hétérogénéités sensibles dans les structures macroéconomiques de départ—les six zones dont les résultats n'ont pas été reportés ici. Ceci milite pour une désagrégation géographique plus forte, qui ne pose pas de difficulté technique majeure, outre celle toujours renouvelée de la collecte de données pour la constitution de TES de base et d'aperçus sur la fiscalité, en particulier pour les grands pays en développement et l'ex-URSS. Un progrès dans ce domaine ne pourra s'accomplir qu'en liaison avec des équipes locales, en particulier lorsqu'il s'agira de saisir les liens entre économie formelle et économie informelle.

Conclusion Générale

Ces travaux ont permis de démontrer, sur le plan théorique, l'existence d'un second dividende de politiques climatiques :

- d'une ampleur modeste, soit dans les simulations présentées un gain en emplois culminant autour de deux centaines de mille, et un gain agrégé en consommation des ménages ne dépassant pas le demi-point de pourcentage. Ces chiffres ne sont bien évidemment pas à prendre au pied de la lettre mais comme des ordres de grandeur des potentiels en jeu;
- robuste à un jeu d'hypothèses paramétriques contrastées sur ses déterminants clés, soit l'efficacité des signaux-prix en matière de changement technique, et l'impact de la contrainte de rareté du capital;
- pour une majorité de structures économiques, selon les résultats du chapitre VIII, dont les zones géographiques fournissent une palette de conditions macro-économiques variées en termes d'intensité énergétique, d'importance relative de la production d'énergie dans la production distribuée, de la consommation d'énergie dans le budget des ménages.

Une condition restrictive majeure de ce résultat est déterminée par le chapitre VII : la politique climatique envisagée doit permettre une levée de fonds publics et ces fonds doivent être recyclés dans une baisse de prélèvements distorsifs préexistants.

En outre, le chapitre VII étudie les effets redistributifs d'une politique climatique sur 35 branches d'activité, en s'intéressant à la variation des coûts de production que ces branches subissent. Il apparaît que les effets de premier ordre, très inflationnistes pour les branches les plus intensives en énergie, sont très diminués voire inversés au second ordre, dès lors que le recyclage dans une baisse sur la fiscalité du travail est pris en compte. En outre, les branches restant affectées par la politique mise en place sont susceptibles d'en être exemptées pour un coût d'efficacité faible à performance environnementale maintenue.

L'ensemble de ces résultats sont en ligne avec les résultats analytiques et numériques les plus récents.

Sur le plan méthodologique, on a présenté les modalités et les conséquences du couplage entre le modèle d'équilibre général calculable IMACLIM et le modèle technico-économique des marchés de l'énergie POLES. Les chapitre V et VIII présentent des conclusions qui dépassent les caractéristiques propres de chacun des

deux modèles. L'entreprise de couplage entre modélisations *bottom-up* et *top-down* est pleinement justifiée dans la mesure où :

- les estimations tirées des modèles *bottom-up* s'en trouvent profondément changées : il est démontré que les effets d'équilibre général, et notamment les modalités de recyclage d'éventuelles ressources fiscales des politiques climatiques, ne sont pas de second ordre mais modifient considérablement les conclusions obtenues en équilibre partiel;
- les estimations produites par les modèles *top-down* sont elles-aussi susceptibles d'être modifiées : dans une moindre mesure, si les spécifications retenues pour la modélisation des choix du producteur et du consommateur demeurent dans le champ des formes les plus usitées (CES, LES)—mais la qualité du calibrage des élasticités de substitution utilisées conserve une influence non négligeable; bien plus profondément dès lors que le modélisateur s'affranchit des spécifications conventionnelles et se concentre sur la reproduction des réactions mises en lumière par les modèles technico-économiques. Les divergences sont alors d'autant plus saisissantes que les abaques synthétisant les résultats *bottom-up* présentent des courbures marquées.

On insistera beaucoup sur le recours dans la modélisation *top-down* à des formes fonctionnelles *ad hoc*, sans révélation des fonctions d'optimisation sous-jacentes. Un tel choix est nécessaire dans la mesure où les processus économiques de production et de consommation ne sont la source d'externalités environnementales qu'au travers de réalités techniques; l'objectif premier des modèles technico-économiques est la représentation fidèle de ces réalités, et seul un calibrage des modèles *top-down* « au plus près » est à même de garantir une prise en compte optimale de cette représentation dans un cadre d'équilibre général. S'interrogeant sur la portée de ce choix, on doit garder à l'esprit que les spécifications usuelles ne sont que des approximations du réel retenues avant tout pour leur souplesse d'utilisation analytique; dans un exercice de modélisation calculable leur justification première perd de sa pertinence, et l'on peut sans regret abandonner leur utilisation pour se tourner vers des spécifications plus libres, qui ne conservent que le strict minimum des contraintes de production.

Pour clore ces travaux, soulignons combien les recherches synthétisées dans ce document demeurent en chantier : des progrès sont encore à faire dans chacun des deux domaines délimités ci-dessus, et en particulier dans le développement des

interactions entre les différents types de modèles utilisés pour l'évaluation macroéconomique des politiques climatiques.

Notamment, un développement de l'architecture de modélisation est souhaitable dans la direction de modèles comportementaux plus complexes, à même de représenter certains des comportements soulignés en parties II et III, mais qui n'apparaissent pas dans l'outil IMACLIM :

- raffinement de la description des comportements d'embauche par prise en compte des natures contrastées de la fiscalité sur le travail, facteur de production caractérisé par une grande rigidité, et l'énergie, facteur de production particulièrement adaptatif;
- sophistication de la représentation du rôle de l'incertitude dans les comportements de consommation d'énergie, au niveau du consommateur final en particulier : plus elle est élevée, plus la taxation du carbone lisse les incertitudes dues aux fluctuations des marchés et peut ainsi aider à la formation des anticipations.

Dans une autre direction, le développement du niveau de désagrégation de la production et de la demande finale est nécessaire si l'on veut pouvoir :

- affiner les raisonnements présentés au chapitre VII, et notamment envisager un raisonnement sur les impacts non en termes de coûts mais de valeur des firmes, dans la lignée de ceux de Bovenberg et Goulder (2000)⁹³
- reprendre les résultats de Fortin (1999) concernant une désagrégation du ménage représentatif en trois niveaux de revenu, et le croiser avec la désagrégation sectorielle dans une mesure permettant au moins de distinguer une influence des transports différenciée par niveaux de revenu.

Enfin, le passage à des modèles mondiaux, dont on pourrait penser qu'il ne suppose que la mise en parallèle de versions d'IMACLIM calibrées sur différentes économies, dans l'esprit des résultats présentés au chapitre VIII, soulève la question des fuites de carbone (le *leakage*) liée à celle très délicate des flux de capitaux, qui ne sont pas représentés dans le modèle en l'état. L'éventail des spécifications les plus couramment utilisées en la matière pose le problème assez général d'une surréactivité des flux

⁹³ Qui concluent sur cet indicateur dans un sens identique à nos conclusions du chapitre VII : les pertes de valeur des secteurs les plus touchés sont compensées sur la base d'un *grandfathering* partiel n'entamant que marginalement le second dividende obtenu.

Conclusion Générale

représentés; la mise au point d'une représentation réaliste des mécaniques en œuvre requerra sans doute un effort de recherche conséquent.

Annexes

ANNEXE I.1

SAP12 technical description

SAP modeling effort primarily builds on the Kyoto Special Issue of the Energy Journal, May 1999 (hereafter EJ), that reports detailed costs of compliance to the Kyoto Protocol for twelve different models⁹⁴ affiliated to the Energy Modeling Forum, from Stanford University.

Building a proxy of each model's marginal abatement cost curves for four regions—the European Union, the United States, Japan and the Canada–Australia–New Zealand (CANZ) group—and extrapolating model-specific curves for economies in transition's and the rest of the world's abatement potential, it provides static 2010 market equilibriums for different policy options.

Part one details how marginal abatement cost curves (MACCs) for the four "western" zone (hereafter Annex II) are reconstructed using EJ data. Part two explains how curves for the economies in transition (EIT) and the rest of the world (RoW) are derived from supplementary EJ data and basic assumptions, in consistency with the Annex II curves and one another. Part three explains how the EIT and RoW curves are modified to account for transaction costs and accessibility of the abatement potentials.

I. Reconstruction of the Annex II MACCs

For their general shape, flexibility and ease of application (straightforward integration, obvious inverse function), simple $a x^n$ functional forms are chosen to reconstruct the curves.

Fig. 8 p. xxxi and 10 p. xxxvii of the introduction to the EJ respectively give

- carbon taxes necessary for compliance in 2010 under four different trading regimes: *No Trading*, *Annex B Trading*, *Double Bubble* and *Global Trading*;

⁹⁴ Two of those models, GRAPE and CETA, giving estimates for one zone only (resp. Japan and the United States), were dropped. POLES and WAGEM, a French and a German model not part of the EMF, were added to SAP based on data provided by its modelers.

- estimated marginal abatement cost curves in 2010, obtained by plotting the points above with regard to the percentage of abatement observed from a 2010 reference;

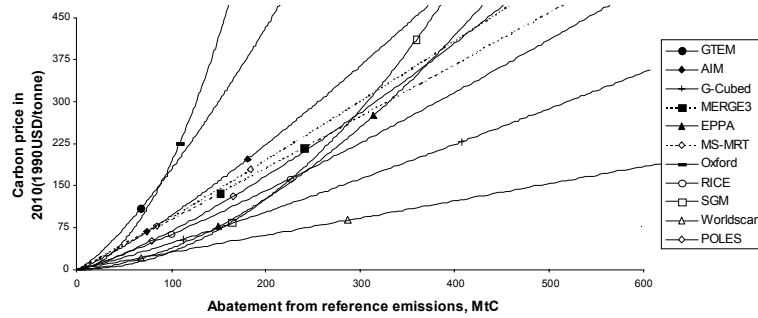
Crossing the two figures we get for each model and zone two (*abatement, marginal price*) points necessary for the calibration of our functional forms. Those two points are specifically chosen as the *No Trading* and *Annex B Trading* results⁹⁵, so that our runs for the corresponding regimes match the EJ results exactly. With (x_1, p_1) and (x_2, p_2) this data, the chosen functional form

$$\begin{cases} p_1 = a x_1^n \\ p_2 = a x_2^n \end{cases}$$

yields

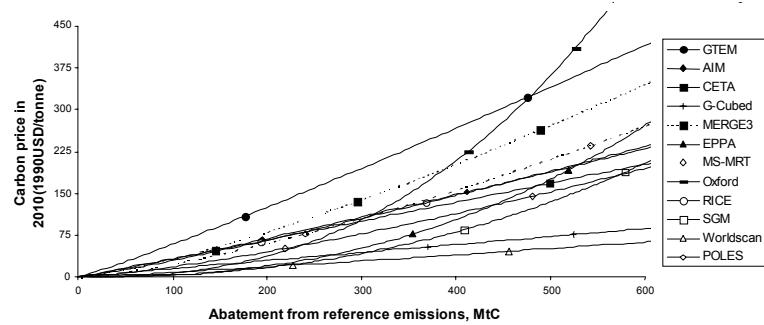
$$\begin{cases} n = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \\ a = \frac{p_1}{x_1^n} \end{cases}$$

MACCs are plotted using these (a, n) couples for zones and models, with the following results: (markers on curves indicate the *No Trading* and *Annex B Trading* points)

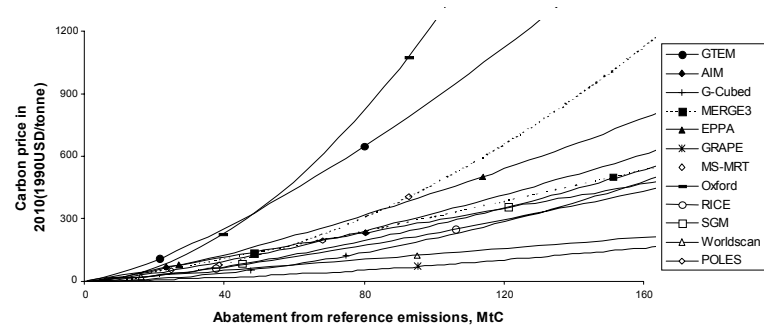


Graphique A.1 Reconstructed MACCs - European Union

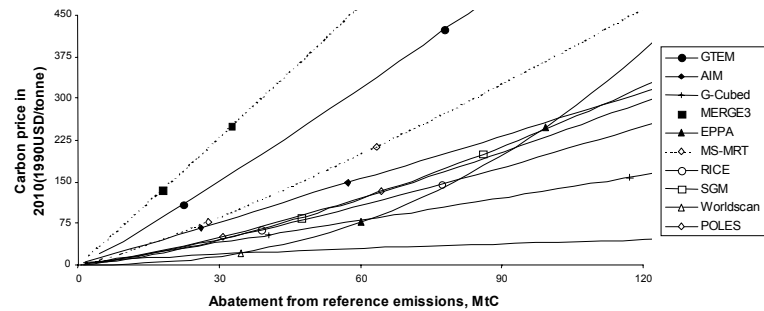
⁹⁵ Note that fig. 8 gives abatements in percentage of the model specific reference cases (2010) emissions. A unique set of 1990 carbon emissions per zone (UNFCCC data) is used to translate those abatements to metric tons.



Graphique A.2 Reconstructed MACCs - United States



Graphique A.3 Reconstructed MACCs - Japan



Graphique A.4 Reconstructed MACCs - CANZ

The corresponding α and n coefficients are the following.

European Union			United States of America		
	<i>a</i>	<i>n</i>		<i>a</i>	<i>n</i>
ABARE-GTEM	0,4980	1,2770	ABARE-GTEM	0,3861	1,0922
AIM	0,3662	1,2100	AIM	0,2083	1,0963
CETA	n.a.	n.a.	CETA	0,307121111	1,015494199
G-Cubed	0,2668	1,1234	G-Cubed	0,1672	0,9780
GRAPE	n.a.	n.a.	GRAPE	n.a.	n.a.
MERGE3	0,8143	1,0193	MERGE3	0,0749	1,3198
MIT-EPPA	0,0132	1,7300	MIT-EPPA	0,0001	2,3928
MS-MRT	0,6902	1,0654	MS-MRT	0,0448	1,3625
Oxford	0,0293	1,9069	Oxford	0,0001	2,4731
POLES	0,1889	1,2799	POLES	0,0395	1,3302
RICE	0,2860	1,1697	RICE	0,1438	1,1570
SGM	0,0029	2,0177	SGM	0,0001	2,2773
WAGEM	0,0557	1,4356	WAGEM	0,0035	1,7714
Worldscan	0,3084	0,9990	Worldscan	0,0471	1,1252

Japan			CANZ group		
	<i>a</i>	<i>n</i>		<i>a</i>	<i>n</i>
ABARE-GTEM	1,7430	1,3510	ABARE-GTEM	3,0750	1,0904
AIM	2,8177	1,0075	AIM	2,1651	1,0029
CETA	n.a.	n.a.	CETA	n.a.	n.a.
G-Cubed	0,0516	1,8005	G-Cubed	1,1114	1,0061
GRAPE	0,050907829	1,589129617	GRAPE	n.a.	n.a.
MERGE3	1,5899	1,1471	MERGE3	5,9271	1,0260
MIT-EPPA	1,0549	1,3026	MIT-EPPA	0,0038	2,3301
MS-MRT	0,0837	1,8734	MS-MRT	1,1411	1,2126
Oxford	0,2547	1,8439	Oxford	n.a.	n.a.
POLES	0,7108	1,3308	POLES	0,5079	1,2844
RICE	0,5122	1,3281	RICE	0,5800	1,2249
SGM	0,3368	1,4526	SGM	0,2745	1,4270
WAGEM	0,1908	1,6824	WAGEM	0,0141	2,0767
Worldscan	1,2879	1,0045	Worldscan	2,1432	0,6156

II. Economies in transition and Rest of the world abatement potentials

To complete the picture, estimated MACCs are constructed for the EIT (Annex B countries outside Annex II) and RoW abatement potentials. In both cases a linear functional form is assumed, for want of more detailed data.

II.1. EIT

All models reported above give estimates for the Annex B Trading price of permits and percentage of abatement in each of the Annex II zones. Our unique set of 1990 emissions converts those percentages to tons; comparing to the total Annex II

abatement in the *No Trading* case we can determine what tonnage is lacking for the completion of Annex II commitment. This tonnage being necessarily exported by the EIT, we obtain a first (*carbon export, price*) point for the EIT "MACC".

A second point is given by each model's assumption about the amount of "hot air" available for trade⁹⁶.

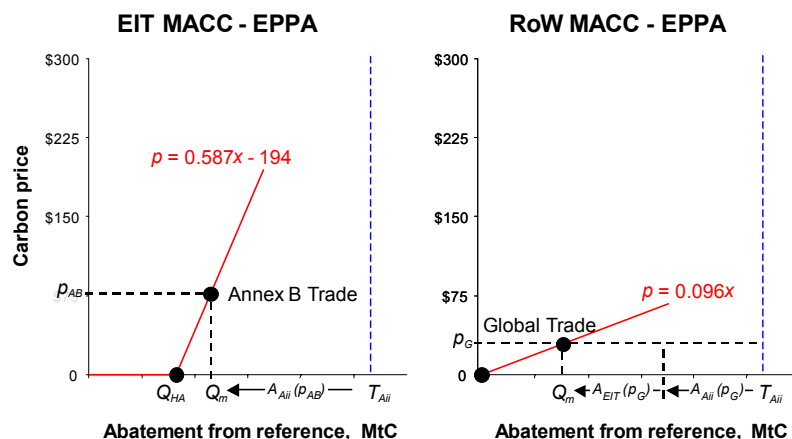
II.2. RoW

EJ also gives *Global Trading* marginal costs of compliance . Using our reconstructed curves for Z4 and our assumption regarding EIT's slopes we determine what abatement is consistent with those prices in each zone, and allot the remaining abatement necessary for compliance to the RoW. This again defines one point of the desired abatement curve.

The second point used to calibrate the curve is simply the origin (absence of no regret potential).

The two graphs below give a visual representation of these constructions for the particular EPPA case. Subsequent equations linking prices and exports are given in red print. p_{AB} and p_G are the price levels given in the EJ for *Annex B-* and *Global Trade* cases; T_{AII} is the abatement target of Annex II, A_X the abatement of zone X function of the international price as defined by our reconstructed curves; Q_m is the quantity of abatement missing for compliance in both cases, Q_{HA} the quantity of hot air retained (330 MtC for EPPA).

⁹⁶ That is the positive difference between EIT's commitment and its actual emissions in 2010.



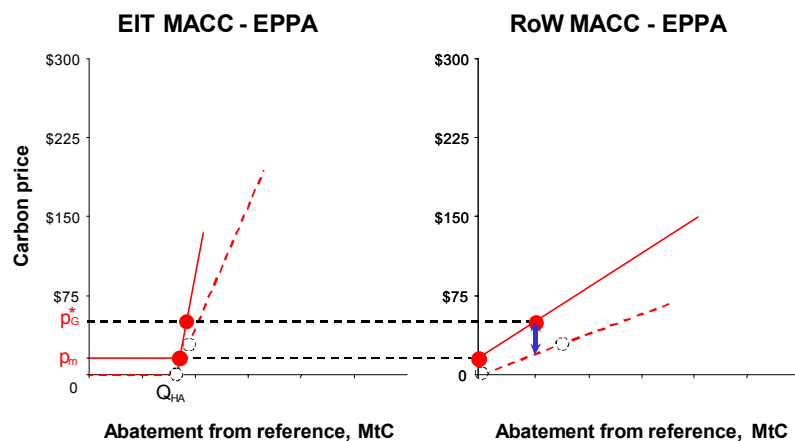
III. Restriction of the Global Trading case: the CDM scenario

EIT and RoW supply curves as constructed above are modified in two ways, following more realistic assumptions about carbon markets:

- First, as many of the articles in EJ point out themselves, it is quite likely that for some reason the full extent of EIT and RoW potential will not be exploited. To account for this SAP allows for an arbitrary cut in the tonnage traded by both zones.
- Second, to prevent a null price on restricted markets with a demand smaller than the amount of available hot air, SAP includes p_m a minimum price on the market, corresponding to the minimum price of carbon credits from CDM projects used by hot air sellers as a monopoly price.

Reasons for the cut in the tonnage traded by both zones can be transaction costs or strict constraints on the nature of CDM and JI projects. Technically speaking, Annex II reductions were constrained to their target minus the desired remaining trading potential and a corresponding marginal price p_G^* derived. Transaction costs are the exact difference between this marginal price and the marginal costs in EIT and CDM.

Again, the two figures below illustrate the construction for the particular EPPA case, from the original dotted slopes to the continuous ones. The blue arrow on the RoW figure represents the transaction costs as defined above.



More information about the models SAP12 integrates can be found in the following list of publications.

Model	References
MS-MRT	Bernstein <i>et al.</i> 1999a, 1999b
Worldscan	Bollen <i>et al.</i> 1999
Oxford model	Cooper <i>et al.</i> 1999
SGM	Edmonds <i>et al.</i> 1995 McCracken <i>et al.</i> 1999
EPPA	Jacoby and Wing 1999 Yang <i>et al.</i> 1996
AIM	Kainuma <i>et al.</i> 1999
GRAPE	Kurosawa <i>et al.</i> 1999
MERGE	Manne <i>et al.</i> 1995 Manne and Richels 1992, 1997, 1999
G-Cubed	McKibbin <i>et al.</i> 1995, 1999
RICE	Nordhaus and Boyer 1999a, 1999b
GTEM	Tulpulé <i>et al.</i> 1999

ANNEXE I.2

Additional tables

Tables I.3b and I.3c below were extracted from the main text, considering the data they contain is not central in the analysis developed there.

		Unrestricted compliance	50% concrete ceiling	50% ceiling + waiver \$75	50% ceiling + waiver \$100
European Union	C	\$6.1–32.4B	\$6.1–32.4B	\$6.1–32.4B	\$6.2–32.5B
	O	\$7.1–37.4B	\$6.4–33.2B	\$6.4–33.2B	\$6.5–33.3B
United States	C	\$12.4–48.4B	\$11.9–48.2B	\$12.3–48.3B	\$12.1–48.3B
	O	\$14.8–51.8B	\$12.6–49.2B	\$12.9–49.3B	\$12.8–49.3B
Japan	C	\$2.6–12.7B	\$2.7–13.1B	\$2.6–12.7B	\$2.6–12.7B
	O	\$3.0–15.1B	\$2.8–13.5B	\$2.7–13.1B	\$2.7–13.2B
Market price	C	\$32–169	\$30–168	\$32–169	\$31–168
	O	\$34–176	\$32–175	\$33–176	\$33–176

Table I.3b Annual costs of compliance with European ceilings on buyers.

		Candidate...	...with \$5 import charge	...with \$10 import charge	...with \$15 import charge
European Union	C	45–68%	46–69%	47–70%	48–71%
	O	47–71%	48–72%	49–73%	49–74%
United States	C	61–89%	62–90%	63–91%	63–92%
	O	64–91%	64–92%	65–93%	66–93%
Japan	C	35–58%	35–58%	36–58%	37–59%
	O	36–59%	37–59%	38–60%	39–60%
Market price	C	\$32–169	\$33–170	\$35–171	\$36–172
	O	\$34–176	\$35–177	\$37–178	\$38–179

Table I.3c Impact of an import charge on the share domestic abatement

As explained in the text, they provide likelihood spaces for the total costs and shares of domestic abatement assuming compliance to the Kyoto Protocol, under different market policies. The *O* (oligopoly) rows give data in the case of an oligopolistic coalition from the EIT on carbon credit markets, as opposed to the *C* (competitive) case.

ANNEXE IV.1

Équations d'IMACLIM

Cette annexe présente l'ensemble des équations d'IMACLIM appliqué à l'étude des impacts pour la France d'une taxation du carbone recyclée dans une diminution des prélèvements sur le travail sous hypothèse de neutralité budgétaire. Elle regroupe :

- une nomenclature explicitant l'ensemble des notations utilisées,
- un formulaire présentant les 61 équations du modèle,
- le commentaire succinct de chacune des 61 équations, complété par l'explication plus développée de trois spécifications particulières,
- le détail de la construction de onze spécifications fondées sur les résultats du modèle bottom-up couplé, dans le cas d'un couplage avec le modèle POLES.

I. Nomenclature

Suivant la définition même de la statique comparative, IMACLIM se résume à un système d'équations de type :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_m) = 0 \\ f_2(x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_m) = 0 \\ \dots \\ f_n(x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_m) = 0 \end{array} \right.$$

où

- les x_i , $i \in [1, n]$, sont les variables (on en a autant que d'équations),
- les p_i , $i \in [1, m]$, $m < n$, sont des paramètres (par définition de valeur fixe),
- les f_i , $i \in [1, n]$, sont des fonctions quelconques, dont certaines sont non-linéaires en x_i (cf. *infra*).

Le *calibrage* consiste à donner un jeu de valeurs à l'ensemble des variables puis à résoudre le système pour déterminer celles que doivent prendre les paramètres afin que les équations soient respectées. IMACLIM utilise comme état initial des variables

permettant ce calibrage un équilibre déduit des comptes de la nation français de 1998 projetés en 2030 (cf. annexe IV.2). L'exercice revient donc à déterminer quelles valeurs les paramètres doivent-ils prendre pour que les grandeurs tirées de comptes réels équilibrés puissent être liées entre elles par les équations considérées.

Tous les paramètres ne tirent cependant pas leur valeur de cette opération de calibrage; le taux de taxe sur les consommations de fossiles, par exemple, est un paramètre exogène (une variable de contrôle); d'autres paramètres sont construits à partir des valeurs de l'équilibre initial, mais selon des équations qui ne sont pas celles du modèle IMACLIM à proprement parler; d'autres enfin voient leurs valeurs fixées en fonction des résultats de modèles technico-économiques. En conséquence de ces distinctions, les notations ci-dessous sont présentées en trois catégories, et dans chacune de ces catégories par ordre alphabétique (les lettres grecques étant classées selon leur dénomination française et non selon leur équivalence dans l'alphabet latin).

I.1. Variables

α_{EE}	Volume unitaire de consommation intermédiaire de bien E dans la production de bien E .
α_{EQ}	Volume unitaire de consommation intermédiaire de bien E dans la production de bien Q .
E	Volume de production de bien E (production et distribution d'énergie transformée).
E_c	Volume de consommation finale de bien E (par les ménages).
E_{cM}	Volume des importations de bien E consommées par les ménages.
E_{exp}	Volume des exportations de bien E .
E_i	Volume de consommation intermédiaire de bien E .
E_{iM}	Volume des importations de bien E consommées par la production.
F_{iE}	Volume de consommation d'énergie fossile (importée) dans la production de bien E .
F_{iQ}	Volume de consommation d'énergie fossile (importée) dans la production de bien Q .

k_E	Volume unitaire de capital fixe consommé dans la production de bien E .
k_Q	Volume unitaire de capital fixe consommé dans la production de bien Q .
L_E	Population active engagée dans la production de bien E .
L_Q	Population active engagée dans la production de bien Q .
l_Q	Intensité en travail du bien Q (volume d'emploi nécessaire à la production d'un bien Q).
p_E	Prix de production du bien E , hors TIPP.
p_{Ec}	Prix du bien E final, consommé par les ménages.
p_{Eexp}	Prix du bien E à l'exportation.
p_{Ei}	Prix du bien E intermédiaire.
Φ	Coefficient de progrès technique.
Π_E	Masse des « profits nets » (cf. <i>infra</i>) de la production de bien E .
Π_Q	Masse des « profits nets » (cf. <i>infra</i>) de la production de bien Q .
p_{LE}	Coût salarial unitaire dans la production de bien E .
p_{LQ}	Coût salarial unitaire dans la production de bien Q .
p_Q	Prix de production du bien Q .
p_{Qck}	Prix du bien Q final, consommé par les ménages ou pour la FBCF.
p_{Qexp}	Prix du bien Q à l'exportation.
p_{Qi}	Prix du bien Q intermédiaire.
p_{Qpub}	Prix du bien Q final consommé par les administrations publiques.
Q	Volume de production de bien Q (bien composite, agrégat de l'ensemble des biens hors E et F).
Q_c	Volume de consommation de bien Q par les ménages.
Q_{ckM}	Volume de bien Q importé à destination des ménages et de la FBCF.
Q_{exp}	Volume de bien Q exporté.
Q_i	Volume de consommation intermédiaire de bien Q .
Q_{iM}	Volume de bien Q importé pour la consommation intermédiaire.

Q_k	Volume de consommation de bien Q pour la FBCF.
Q_{kE}	Volume de consommation de bien Q pour la FBCF de l'offre énergétique.
Q_{kEi}	Volume de consommation de bien Q pour la FBCF dévolue à la réduction de la consommation intermédiaire d'énergie causée par la contrainte carbone.
Q_{kEc}	Volume de consommation de bien Q pour la FBCF dévolue à la réduction de la consommation finale d'énergie causée par la contrainte carbone.
Q_{pub}	Volume de consommation de bien Q par les administrations publiques.
R	Revenu total des ménages (revenu disponible brut).
R_{cons}	Revenu des ménages consommé.
R_{fix}	Revenu des ménages hors salaires, allocations chômage et excédent brut d'exploitation.
σ_E	Pourcentage du salaire net unitaire prélevé dans la production de bien E .
σ_Q	Pourcentage du salaire net unitaire prélevé dans la production de bien Q .
T	Masse des prélèvements obligatoires.
T_{CS}	Montant prélevé au titre des cotisations sociales.
Θ	Coefficient de rendements décroissants.
T_{fix}	Montant de prélèvements considérés invariants (défini par la différence entre la masse totale des prélèvements et les prélèvements explicitement décrits).
T_{IR}	Montant prélevé au titre de l'impôt sur le revenu.
T_{IS}	Montant prélevé au titre de l'impôt sur les sociétés.
T_{prod}	Montant d'impôts à la production, hors TIPP.
T_{TIPP}	Montant prélevé au titre de la TIPP.
T_{TvaE}	Montant de TVA non déductible prélevée sur les ventes de bien E .
T_{TvaF}	Montant de TVA non déductible prélevée sur les ventes de bien F .
T_{TvaQ}	Montant de TVA non déductible prélevée sur les ventes de bien Q .
T_U	Masse des allocations de chômage.
U	Population active au chômage.
w	Salaire net moyen.

w_E Salaire net unitaire dans la production de bien E .

w_Q Salaire net unitaire dans la production de bien Q .

1.2. Paramètres endogènes (soumis au calibrage, ne varient pas avec la contrainte carbone)

α_{QE} Volume unitaire de consommation intermédiaire de bien Q dans le secteur E .

α_{QQ} Volume unitaire de consommation intermédiaire de bien Q dans le secteur Q .

c_{MEc} Constante d'importation du bien E final.

c_{MEi} Constante d'importation du bien E intermédiaire.

c_{MQck} Constante d'importation du bien Q final.

c_{MQi} Constante d'importation du bien Q intermédiaire.

c_{XE} Constante d'exportation du bien E .

c_{XQ} Constante d'exportation du bien Q .

L Quantité de travail dans l'économie (unité définie par la normalisation de p_{LQ}).

l_E Intensité en travail du bien E (volume d'emploi nécessaire à la production d'un bien E).

π_E Taux de marge dans la production de bien E .

π_Q Taux de marge dans la production de bien Q .

r_C Propension à consommer des ménages.

r_{CS} Ratio entre pourcentages des salaires nets prélevés dans les productions de biens E et Q .

r_{EkE} Ratio entre amortissement et investissements dans la production de bien E .

r_{QkQ} Ratio entre amortissement et investissements dans la production de bien Q .

r_{Rfix} Ratio entre revenu dit « fixe » (cf. R_{fix}) et production distribuée.

r_{Tfix} Ratio entre prélèvements dits « fixes » (cf. T_{fix}) et production distribuée.

r_{TPib}	Ratio des prélèvements obligatoires sur le PIB.
r_{Tprod}	Ratio entre impôts à la production hors TIPP et production distribuée.
r_{TQ}	Ratio entre dépenses de consommation publiques et masse des prélèvements obligatoires.
r_w	Ratio entre les salaires nets des productions de biens E et Q .
τ_{CS}	Taux de cotisations sociales salariales.
τ_{IR}	Taux moyen d'impôt sur le revenu.
τ_{IS}	Taux moyen d'impôt sur les sociétés.
τ_{RQk}	Part du revenu investie en FBCF.
t_{TIPP}	Taxe intérieure sur les produits pétroliers, unitaire et forfaitaire.
τ_{TVAE}	Taux de TVA sur le bien E .
τ_{TVAQ}	Taux de TVA sur le bien Q .
τ_{TU}	Taux moyen des allocations chômage (par rapport au salaire moyen).

1.3. Paramètres et variables exogènes, définition et origine

b	Paramètre du système linéaire de dépenses des ménages. Sa valeur est fixée par les informations tirées du modèle <i>bottom-up</i> couplé, selon les mécanismes développés au chapitre V.
δ_c	Taux de baisse de la consommation finale d'énergie pour une contrainte t_c , selon le modèle <i>bottom-up</i> couplé. C'est une fonction de t_c nulle ($\delta_c = 0$) par définition à l'équilibre de référence puis croissant avec t_c .
δ_i	Taux de baisse de la consommation intermédiaire d'énergie pour une contrainte t_i , selon le modèle <i>bottom-up</i> couplé. C'est une fonction de t_i nulle ($\delta_i = 0$) par définition à l'équilibre de référence puis croissant avec t_i .
d_{KEc}	Durée de vie moyenne de l'investissement spécifique de réduction des émissions finales de carbone. Fixé à 7 ans selon les estimations de l'équipe POLES de l'IEPE.

-
- d_{KEi} Durée de vie moyenne de l'investissement spécifique de réduction des émissions intermédiaires carbone. Fixé à 15 ans selon les estimations de l'équipe POLES de l'IEPE.
- E_b Consommation minimale (*basic need*) de bien E des ménages. Sa valeur est elle-aussi fixée par les informations tirées du modèle *bottom-up* couplé, selon les mécanismes développés au chapitre V.
- ε_{MpE} Élasticité-prix des importations de bien E , commune à leurs deux destinations (consommation intermédiaire ou finale). Dans l'idéal la spécification des importations d'énergie transformée est dictée par les conclusions du modèle *bottom-up* couplé, selon l'inflation relative du prix de l'énergie. Dans le cas du couplage avec le modèle POLES, qui ne fournit pas le détail de la composition des soldes commerciaux, on est contraint d'avoir recours à une formulation de type Armington. Une revue extensive de la littérature n'a pas permis de trouver une valeur de cette élasticité susceptible d'être utilisée dans IMACLIM. Tout au plus, des ordres de grandeur sont disponibles, qui permettent de définir un intervalle dans lequel des tests de sensibilité sont effectués.
- ε_{MpQ} Élasticité-prix des importations de bien Q , commune à leurs deux destinations (consommation intermédiaire ou finale). Elle est calculée par régression log-linéaire du rapport entre production domestique et importations sur celui des prix domestiques et internationaux. Des séries temporelles ont pu être constituées à partir de données OCDE et EUROSTAT communiquées par l'INSEE (INSEE 1998, tableaux 13.11 et 13.12), ainsi que, pour les échanges bilatéraux, de données de la base GTAP 5.0. Au total 20 partenaires commerciaux (environ 80% des importations françaises) ont été pris en compte entre 1970 et 1997. Les premières tentatives de régression ont révélé une forte auto-corrélation des résidus (test de Durbin-Watson), qui n'a pu être correctement éliminée par le recours à une régression Prais-Winsten. On en a donc conclu que la série devait présenter des instabilités, ce qui a conduit à recentrer les séries utilisées sur la période 1987-1996. Sur cette dernière période un estimateur de l'élasticité satisfaisant (tests de Student et de Durbin-Watson positifs) a pu être déterminé.
- $\varepsilon_{\Phi IC}$ Élasticité du coefficient de progrès technique Φ à l'investissement cumulé à l'horizon de projection, paramétrée sur des séries historiques selon une mécanique décrite ci-dessous.

- ε_{XpE} Élasticité-prix des exportations d'énergies transformées. Comme dans le cas de l'élasticité-prix des importations de ces énergies, seul un intervalle de la valeur d' ε_{XpE} a pu être déterminé, aucun des modèle statistiques étudiés lors d'une revue de littérature ne correspondant aux spécifications d'IMACLIM.
- ε_{XpQ} Élasticité-prix des exportations de bien composite. Comme pour l'élasticité des importations, l'élasticité des exportations a été estimée à partir de séries temporelles pour la France et ses vingt principaux partenaires commerciaux (couvrant en moyenne 79% des exportations annuelles françaises sur la période étudiée).
- γ_c Millions de tonnes de carbone (MtC) émises par unité physique d'énergie consommée par les ménages. C'est une fonction de t_c selon les résultats du modèle *bottom-up* couplé (cf. *infra*), définie de façon qu'à l'équilibre de référence (hors contrainte carbone, t_c nul) le produit $\gamma_c E_c$ soit égal aux émissions de carbone des ménages telles que projetées par le modèle *bottom-up* couplé dans son scénario de référence.
- γ_i MtC émises par unité physique d'énergie consommée par la production. C'est une fonction de t_i selon les résultats du modèle *bottom-up* couplé (cf. *infra*), définie de façon qu'à l'équilibre de référence (hors contrainte carbone, t_i nul) le produit $\gamma_i E_i$ soit égal aux émissions de carbone des ménages telles que projetées par le modèle *bottom-up* couplé dans son scénario de référence.
- κ_c Paramètre représentant la courbure de la courbe de coût marginal d'abattement (CCMA) des émissions finales de carbone autour de l'horizon de projection considéré (2030) : en tout point de la CCMA κ_c donne le rapport entre l'aire sous la courbe depuis l'origine et le produit des coordonnées du point (cf. *infra*).
- κ_i Paramètre représentant la courbure de la courbe de coût marginal d'abattement des émissions intermédiaires de carbone autour de l'horizon de projection considéré (2030). Cf. κ_c ci-dessus.
- I_Φ Asymptote du progrès technique, fixée selon les développements présentés ci-dessous. Les test de sensibilité ne révèlent pas un poids prépondérant de cette hypothèse.
- P Population active. La projection en 2030 de la population active française est donnée par le CEPII. Elle permet de traduire en emplois réels les variations observées de l'intensité en travail.

p_{EcM}	Prix du bien E final à l'importation, hors TVA. Fixé de façon à être égal, TVA comprise, au prix final domestique de l'énergie transformée.
p_{EiM}	Prix du bien E intermédiaire à l'importation, hors TVA. Fixé de façon à être égal, TVA comprise, au prix intermédiaire domestique de l'énergie transformée.
p_F	Prix du bien fossile F importé. Fixé de la même manière que le prix du bien énergie. Le choix, arbitraire si ce n'est qu'il permet une certaine homogénéité dans les ordres de grandeur des variables et paramètres, n'a aucune influence sur les résultats du modèle.
p_{QckM}	Prix du bien Q final à l'importation, hors TVA. Fixé de façon à être égal, TVA comprise, au prix final domestique du bien composite.
p_{QiM}	Prix du bien Q intermédiaire à l'importation, hors TVA. Fixé de façon à être égal, TVA comprise, au prix intermédiaire domestique du bien composite.
Q_b	Consommation minimale (<i>basic need</i>) de bien Q des ménages. Le chapitre V donne le détail de la manière dont les paramètres d'une fonction LES sont fixés à partir des résultats du modèle POLES.
ρ_c	Base de la TIPP par unité d'énergie finale consommée, calculée à partir des rentrées de TIPP projetées, attribuées aux consommations des ménages selon les résultats du modèle <i>bottom-up</i> couplé.
ρ_i	Base de la TIPP par unité d'énergie intermédiaire consommée, calculée à partir des rentrées de TIPP projetées, attribuées aux consommations des entreprises selon les résultats du modèle <i>bottom-up</i> couplé.
$r_{\pi m}$	Part de l'EBE réalisée par les ménages. Fixé à partir des comptes de la nation 1998 et appliqué tel quel en 2030.
$r_{\pi e}$	Part de l'EBE réalisée par les entreprises. Fixé à partir des comptes de la nation 1998 et appliqué tel quel en 2030, faute d'une meilleure hypothèse.
τ_{actEc}	Taux d'actualisation des investissements d'énergie des ménages, cf. <i>infra</i> .
τ_{actEi}	Taux d'actualisation des investissements d'énergie des entreprises, cf. <i>infra</i> .
τ_{EcK}	Part de l'économie d'énergie des ménages due à l'investissement. Estimée à 50% par l'équipe POLES.
τ_{EiK}	Part de l'économie d'énergie des entreprises due à l'investissement. Estimée à 100% par l'équipe POLES.

- $\tau_{év}$ Part des investissements dans la production et l'économie de E n'affectant pas la productivité de Q (mesure de l'effet d'éviction). L'une des principales variables de contrôle du modèle.
- τ_U Taux de chômage en référence. L'une des variables de contrôle du modèle.
- t_c Taxe carbone unitaire forfaitaire sur les émissions de carbone des ménages⁹⁷. La principale variable de contrôle du modèle.
- t_i Taxe carbone unitaire forfaitaire sur les émissions de carbone de la production. La principale variable de contrôle du modèle.

II. Formulaire

Dans les équations ci-dessous, le nom de variables indicé d'un 0 désigne la valeur que prennent ces variables dans l'équilibre de référence—l'équilibre déduit des comptes de la nation 1998 projetés en 2030 hors contrainte carbone (cf. *infra*). Les notations qui ne sont pas présentées ci-dessus sont explicitées dans le commentaire de chaque équation.

II.1. Prix des biens

$$p_Q = (p_{Qi} \alpha_{QQ} + p_{Ei} \alpha_{EQ} + p_F (1 + \tau_{TvaF}) \frac{F_{iQ}}{Q} + p_{LQ} l_Q + p_{Qck} k_Q) \frac{\Theta}{\Phi} + p_Q \pi_Q \quad (1)$$

$$p_E = (p_{Qi} \alpha_{QE} + p_{Ei} \alpha_{EE} + p_F (1 + \tau_{TvaF}) \frac{F_{iE}}{E} + p_{LE} l_E + p_{Qck} k_E) \frac{\Theta}{\Phi} + p_E \pi_E \quad (2)$$

$$p_{Qi} = \frac{Q_{iM}}{Q_i} p_{QIM} (1 + \tau_{TVAQ}) + \left(1 - \frac{Q_{iM}}{Q_i}\right) p_Q \quad (3)$$

⁹⁷ Pour information, les contenus carbonés γ étant exprimés en millions de tonnes de carbone, et l'ensemble des valeurs nominales d'IMACLIM en milliards de francs 1998 (cf. les TES), l'unité de t_i et t_c dans le modèle est donc le milliard de francs par million de tonne de carbone, ou plus simplement le millier de francs par tonne de carbone.

$$p_{Ei} = \frac{E_{iM}}{E_i} (p_{EiM} + \rho_i t_{TIPP} + \gamma_i t_i) (1 + \tau_{TVAE}) + \left(1 - \frac{E_{iM}}{E_i}\right) (p_E + \rho_i t_{TIPP} + \gamma_i t_i) \quad (4)$$

$$p_{Qck} = p_{QckM} (1 + \tau_{TVAQ}) + \left(1 - \frac{Q_{ckM}}{Q_c + Q_k}\right) p_Q (1 + \tau_{TVAQ}) \quad (5)$$

$$p_{Ec} = \frac{E_{cM}}{E_c} (p_{EcM} + \rho_c t_{TIPP} + \gamma_c t_c) (1 + \tau_{TVAE}) + \left(1 - \frac{E_{cM}}{E_c}\right) (p_E + \rho_c t_{TIPP} + \gamma_c t_c) (1 + \tau_{TVAE}) \quad (6)$$

$$p_{Qpub} = p_Q (1 + \tau_{TVAQ}) \quad (7)$$

$$p_{Qexp} = p_Q \quad (8)$$

$$p_{Eexp} = p_E \quad (9)$$

II.2. Consommations

$$Q = Q_i + Q_c + Q_{pub} + Q_k + Q_{exp} - Q_{iM} - Q_{ckM} \quad (10)$$

$$E = E_i + E_c + E_{exp} - E_{iM} - E_{cM} \quad (11)$$

$$Q_i = \frac{\Theta}{\Phi} (\alpha_{QQ} Q + \alpha_{QE} E) \quad (12)$$

$$E_i = \frac{\Theta}{\Phi} (\alpha_{EQ} Q + \alpha_{EE} E) \quad (13)$$

$$\frac{F_{iQ}}{Q} = r_{FQE} \frac{F_{iE}}{E} \quad (14)$$

$$F_{iE} = f_I (t_i \gamma_{i0} E_i + t_c \gamma_{c0} E_c) \quad (15)$$

$$\frac{p_{Qpub} Q_{pub}}{T} = \tau_{GQ} \quad (18)$$

$$\frac{p_{Qck} Q_k}{R} = \tau_{Qk} \quad (19)$$

$$Q_{kE} = f_2 (t_i \gamma_{i0} E_i + t_c \gamma_{c0} E_c) \quad (20)$$

$$Q_{kEi} = \frac{1}{d_{kEi}} \kappa_i \left(\frac{1 + \tau_{actEi} - (1 + \tau_{actEi})^{1-d_{kEi}}}{\tau_{actEi}} t_i \tau_{EiK} (\gamma_{i0} E_{i0} - (1 - \delta_i) \gamma_i E_{i0}) \right) \quad (21)$$

$$Q_{kEc} = \frac{1}{d_{kEc}} \kappa_c \left(\frac{1 + \tau_{actEc} - (1 + \tau_{actEc})^{1-d_{kEc}}}{\tau_{actEc}} t_c \tau_{EcK} (\gamma_{c0} E_{c0} - (1 - \delta_c) \gamma_c E_{c0}) \right) \quad (22)$$

$$\frac{Q_i - Q_{iM}}{Q_{iM}} \left(\frac{p_Q}{p_{QiM} (1 + \tau_{TvaQ})} \right)^{\varepsilon_{MpQ}} = c_{MQi} \quad (23)$$

$$\frac{Q_c + Q_k - Q_{ckM}}{Q_{ckM}} \left(\frac{p_Q}{p_{QckM}} \right)^{\varepsilon_{MpQ}} = c_{MQck} \quad (24)$$

$$\frac{E_i - E_{iM}}{E_{iM}} \left(\frac{p_E + \rho_i t_{TIPP} + \gamma_i t_i}{p_{EiM} + \rho_i t_{TIPP} + \gamma_i t_i} \right)^{\varepsilon_{MpE}} = c_{MEi} \quad (25)$$

$$\frac{E_c - E_{cM}}{E_{cM}} \left(\frac{p_E + \rho_c t_{TIPP} + \gamma_c t_c}{p_{EcM} + \rho_c t_{TIPP} + \gamma_c t_c} \right)^{\varepsilon_{MpE}} = c_{MEc} \quad (26)$$

$$E_{exp} \left(\frac{p_{Eexp}}{p_{EiM}} \right)^{\varepsilon_{XpE}} = c_{XE} \quad (27)$$

$$Q_{exp} \left(\frac{p_{Qexp}}{p_{QiM}} \right)^{\varepsilon_{XQ}} = c_{XQ} \quad (28)$$

II.3. Consommations unitaires

$$\alpha_{EQ} = f_3 \left(\frac{p_{Ei}}{p_{LQ}} \right) \quad (29)$$

$$\alpha_{EE} = f_4 (p_{Ei}) \quad (30)$$

II.4. Travail

$$p_{LQ} = w_Q (1 + \sigma_Q) \quad (31)$$

$$p_{LE} = w_E (1 + \sigma_E) \quad (32)$$

$$\frac{w_Q}{p_Q} = w_{QI} U^{w_{Q2}} \quad (33)$$

$$\frac{w_E}{w_Q} = r_w \quad (34)$$

$$w = \frac{w_Q L_Q + w_E L_E}{L_Q + L_E} \quad (35)$$

$$L_Q = \frac{\Theta}{\Phi} l_Q Q \quad (36)$$

$$L_E = \frac{\Theta}{\Phi} l_E E \quad (37)$$

$$L = L_Q + L_E + U \quad (38)$$

$$\frac{\alpha_{EQ}}{l_Q} = f_5 \left(\frac{p_{Ei}}{p_{LQ}} \right) \quad (39)$$

II.5. Revenus

$$R = R_{fix} + (1 - \tau_{IR})$$

$$\left(w_Q L_Q + w_E L_E + T_U + r_{\pi m} \left(\Pi_Q + \Pi_E + p_{Qck} \frac{\Theta}{\Phi} (k_Q Q + k_E E) - T_{prod} \right) \right) \quad (40)$$

$$\frac{R_{fix}}{p_Q Q} = r_{Rfix} \quad (41)$$

$$\frac{R_{cons}}{R} = r_C \quad (42)$$

$$T_U = \tau_U w U \quad (43)$$

II.6. Prélèvements

$$T = T_{CS} + T_{TvaQ} + T_{TvaE} + T_{TvaF} + T_{TIIP} + t_i \gamma_i E_i + t_c \gamma_c E_c + T_{IR} + T_{IS} + T_{fix} + T_{prod} \quad (44)$$

$$\frac{\sigma_E}{\sigma_Q} = r_{CS} \quad (45)$$

$$\frac{T}{p_Q Q} = r_T \quad (46)$$

$$\frac{T_{fix}}{p_Q Q} = r_{Tfix} \quad (47)$$

$$\frac{T_{prod}}{p_Q Q} = r_{Tprod} \quad (48)$$

$$T_{TIIP} = t_{TIIP} (\rho_i E_i + \rho_c E_c) \quad (49)$$

$$T_{IR} = \tau_{IR} \left(w_Q L_Q + w_E L_E + T_U + r_{\pi m} (\Pi_Q + \Pi_E + p_{Qck} \frac{\Theta}{\Phi} (k_Q Q + k_E E) - T_{prod}) \right) \quad (50)$$

$$T_{IS} = \tau_{IS} \left(r_{\pi e} (\Pi_Q + \Pi_E + p_{Qck} \frac{\Theta}{\Phi} (k_Q Q + k_E E) - T_{prod}) \right) \quad (51)$$

$$T_{CS} = \sigma_Q w_Q L_Q + \sigma_E w_E L_E \quad (52)$$

$$T_{TvaQ} = \tau_{TvaQ} (p_Q (Q_c + Q_k - Q_{ckM} + Q_{pub}) + p_{QiM} Q_{iM} + p_{QckM} Q_{ckM}) \quad (53)$$

$$\begin{aligned} T_{TvaE} = & \tau_{TvaE} (p_E + \rho_c t_{TIIP} + \gamma_c t_c) (E_c - E_{cM}) + \tau_{TvaE} (p_{EiM} + \rho_i t_{TIIP} + \gamma_i t_i) E_{iM} \\ & + \tau_{TvaE} (p_{EcM} + \rho_c t_{TIIP} + \gamma_c t_c) E_{cM} \end{aligned} \quad (54)$$

$$T_{TvaF} = \tau_{TvaF} p_F (F_{iQ} + F_{iE}) \quad (55)$$

II.7. Autres

$$\frac{k_Q Q}{Q_k - (Q_{kE} + Q_{kEc})} = \tau_{QkQ} \quad (56)$$

$$\frac{k_E E}{Q_{kE}} = \tau_{EkE} \quad (57)$$

$$\Pi_Q = \pi_Q p_Q Q \quad (58)$$

$$\Pi_E = \pi_E p_E E \quad (59)$$

$$\Phi = l_\Phi + (1-l_\Phi) \left(\frac{\Phi_2 + 33 \frac{1}{2} \Phi_3 \left(1 + \left(\frac{Q_k - \tau_{év} (Q_{kE} - Q_{kE0} + Q_{kEi} + Q_{kEc})}{\Phi_4} \right)^{\frac{33}{32}} \right)^{\frac{\varepsilon_{\Phi/IC}}{1-l_\Phi}}}{\Phi_I} \right) \quad (60)$$

$$\Theta = \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{\frac{p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q}{p_{Q0} - p_{Qk0} k_{Q0} - p_{Q0} \pi_Q}} \quad (61)$$

II.8. Commentaires

- (1-2) Les prix de production sont égaux à la somme des consommations intermédiaires unitaires, des consommations unitaires des facteurs travail et capital, et de la marge. L'ensemble des consommations de facteurs sont multipliées par un ratio qui rassemble les impacts du progrès technique et des hypothèses faites sur les rendements décroissants. Le bien F n'est pas détaillé : on néglige la production domestique d'énergies fossiles (ce qui revient à considérer que ses niveaux très faibles restent agrégés au bien E) pour considérer que l'ensemble des consommations sont importées.
- (3-6) Les prix de vente aux consommations intermédiaire et finale sont les sommes pondérées des prix domestiques et des prix à l'importation. La TVA s'applique non seulement aux consommations finales mais aussi aux consommations intermédiaires importées. La TIPP s'applique aux ventes de

produits pétroliers à usage de carburant, en quantité ρ spécifique aux consommations d'énergie transformée des entreprises (ρ_i) et des ménages (ρ_e). L'évolution des coefficients ρ est dictée par les résultats du modèle *bottom-up* couplé (évolution différenciée des consommations de carburant selon les niveaux de contrainte carbone).

- (7) Le prix de la consommation de bien composite des administrations publiques est égal au seul prix de production domestique augmentée de la TVA (elle est en effet perçue sur ladite consommation). Ce traitement résulte d'une simplification, les importations à destination des administrations publiques constituant une part négligeable de leur consommation. Soulignons en outre que dans la comptabilité nationale française la consommation finale de produits énergétiques des administrations est nulle (les services non marchands, seule consommation des administrations, sont agrégés au bien Q).
- (8-9) Les prix aux exportations sont égaux aux prix de production. La masse des subventions aux exportations, que l'on pourrait s'attendre à voir apparaître ici, a été agrégée à celle des exportations lors du traitement de la comptabilité nationale. Son détail ne semble pas nécessaire au vu des objectifs premiers d'IMACLIM.
- (10-11) Ces deux équations assurent l'équilibre physique, en volumes, du modèle : les volumes consommés et exportés de chacun des deux biens Q et E sont égaux à la somme des volumes produits et importés.
- (12-13) Les volumes de consommation intermédiaire des deux biens Q et E se calculent à partir des consommations unitaires et des volumes produits, sans oublier l'influence du facteur de progrès technique et de rendements décroissants.
- (14-15) Les consommations unitaires d'énergies fossiles dans les productions de biens Q et E varient de manière identique, selon une fonction tirée des résultats du modèle *bottom-up* couplé.
- (16-17) La consommation finale des ménages suit une formulation LES (*Linear Expenditure System*, système linéaire de dépenses). Les trois paramètres de cette fonction sont calibrés sur les résultats du modèle *bottom-up* couplé (cf. chap. V pour l'exemple de POLES).

-
- (18) La part des prélèvements obligatoires consommée est invariable, fixée selon l'équilibre de référence (comptes de la nation 1998 projetés en 2030).
 - (19) La formation brute de capital fixe (FBCF) est une fonction constante du revenu disponible brut.
 - (20) Les investissements d'offre énergétique sont une fonction—paramétrée sur les indications du modèle *bottom-up* couplé—du prélèvement carbone *ex-ante*, soit à volume de consommation d'énergie et à contenu carbone constants (cf. *infra*).
 - (21-22) Dans l'idéal les investissements de conservation d'énergie intermédiaire et finale sont eux-aussi fonction du prélèvement carbone *ex-ante* selon les indications du modèle *bottom-up* couplé; ces deux équations représentent cependant une analyse coût-bénéfices (détaillée ci-dessous) due à l'absence d'informations sur ces investissements de conservation dans le modèle POLES.
 - (23-26) Les importations de bien Q et de bien E à usage intermédiaire et final sont traitées par deux spécifications Armington. Les constantes calibrées correspondent au rapport des poids dans la fonction CES sous-jacente de chacun des biens domestique et international, élevé à la puissance de l'élasticité.
 - (27-28) Les volume de bien Q et E exportés sont traités, à l'instar des volumes importés, par une spécification Armington.
 - (29) La consommation unitaire de bien E dans la production de bien composite évolue en fonction du rapport des prix du bien E et du travail, ces deux facteurs étant substituables parallèlement à l'évolution du stock de capital (cf. chap. IV et V, et *infra*).
 - (30) La consommation unitaire de bien E dans la production de bien E évolue en fonction du prix intermédiaire du bien E uniquement, aucune substitution autre que celle de capital n'étant envisagée. La fonction utilisée est détaillée ci-dessous et au chap. V dans le cas d'un couplage avec POLES.
 - (31-32) Les coûts salariaux des deux secteurs sont égaux aux salaires nets augmentés des prélèvements sociaux.
 - (33) Boucle salaire/chômage : une baisse du chômage entraîne une hausse mécanique du salaire réel selon les coefficients w_{Q1} et w_{Q2} , que l'on calibre

sur l'équilibre de départ, soit en posant $\frac{w_{Q0}}{p_{Q0}} = w_{Q1} U_0^{w_{Q2}}$, et selon une hypothèse inflationniste : telle baisse du niveau de chômage, ou rapprochement du plein emploi, suppose telle hausse du salaire réel.

- (34) Le rapport des salaires dans les productions des deux biens est constant; en d'autres termes le salaire réel dans la production de bien *E* évolue comme le salaire réel dans la production de bien *Q*.
- (35) Le salaire moyen est égal au rapport de la masse salariale totale sur l'emploi total.
- (36-37) L'emploi total des deux secteurs de production est obtenu en multipliant les intensités en travail par les volumes produits, sans oublier la correction du facteur regroupant effet de productivité et de rendements décroissants.
- (38) La main d'œuvre est supposée constante, et doit être répartie entre les deux productions et le chômage.
- (39) Le rapport des consommation unitaires de bien *E* et de travail dans la production de bien *Q* est fonction du rapport des prix de ces deux facteurs. La fonction en question est construite à partir des résultats du modèle bottom-up couplé suivant les règles de base de l'optimisation des consommations de facteurs (cf. chap. V pour l'exemple de POLES).
- (40) Le revenu disponible brut est égal à la somme du revenu disponible dit « fixe » (dont on suppose qu'il ne varie qu'à l'image de la production distribuée en cas de perturbation) et du revenu disponible explicite : revenu du travail, indemnités de chômage, part de l'EBE réalisée par les ménages.
- (41) La part dite fixe du revenu disponible brut évolue comme la production distribuée.
- (42) La propension à consommer est constante.
- (43) L'indemnisation des chômeurs se fait en proportion fixe du salaire moyen.
- (44) Composition du total des prélèvements obligatoires, comprenant les éventuels revenus d'une taxe carbone.
- (45) Les prélèvements sur le travail évoluent de la même manière dans les deux productions.

-
- (46-47) Les niveaux du total des prélèvements obligatoires et des prélèvements non explicites évoluent comme la production distribuée.
 - (48) Le niveau des impôts à la production hors TIPP évolue comme la production distribuée de bien composite.
 - (49) La Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers est prélevée sur la part de produits pétroliers des consommations intermédiaire et finale d'énergie transformée (elle ne s'applique qu'aux consommations à usage de carburant et de chauffage, et donc pas aux consommations de produits fossiles non transformés).
 - (50) L'impôt sur le revenu est prélevé sur la somme des salaires, des indemnités de chômage, et de la part de l'EBE revenant aux ménages.
 - (51) L'impôt sur les sociétés est prélevé sur la part de l'EBE revenant aux entreprises.
 - (52) Les cotisations sociales sont constituées d'une proportion fixe de la masse salariale nette de chacun des deux secteurs de production.
 - (53-55) La Taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA) est constituée d'une proportion fixe des consommations finales et des importations, nominales hors TVA, de chacun des trois biens.
 - (56) Le ratio entre consommation de capital fixe de la production de bien Q et FBCF totale, nette des investissements vers la production de bien E et l'économie d'énergie finale, est fixé.
 - (57) Le ratio entre consommation de capital fixe de la production de bien E et FBCF de l'offre énergétique est fixé.
 - (58-59) La masse des « marges » (somme de l'excédent net d'exploitation, ENE, et des impôts à la production, sauf pour la production de bien E ou elle n'est constitué que de l'ENE) de chacun des deux secteurs de production est définie comme une proportion fixe de la production distribuée.
 - (60) Définition du coefficient de progrès technique Φ . La construction de cette forme fonctionnelle, la définition des quatre variables Φ_I à Φ_4 et la paramétrisation de l_Φ et $\varepsilon_{\Phi IC}$ sont détaillées ci-dessous.

- (61) Rendements décroissants. L'évolution du niveau général de production (de bien composite) augmente ou diminue les consommations de facteur selon une spécification simple, cf. *infra*.

III. Spécifications particulières

Les trois spécifications décrites ci-dessous le sont dans le cas particulier d'une articulation entre IMACLIM et le modèle POLES pour l'évaluation des impacts de politiques climatiques sur la France en 2030. Il est clair qu'elles sont particulièrement dépendantes des données dont le modélisateur dispose, et sont donc susceptibles d'être modifiées dans l'hypothèse où une autre région ou un autre horizon temporel seraient considérés.

III.1. Définition et paramétrage du progrès technique endogène Φ

Le processus de production d'IMACLIM intègre un progrès technique endogène neutre au sens de Hicks : la variable Φ divise les consommations de facteurs primaires (capital et travail) et secondaires (biens Q , E et F) dans les deux productions nationales.

En normant cette variable Φ en une année de référence variant entre 1978 et 1997, on peut lui affecter vingt séries de valeurs historiques sur cet intervalle, par le ratio entre production distribuée réelle et consommations réelles de facteurs primaires et secondaires, chacune des consommations réelles de facteurs étant normée selon sa valeur dans l'année de référence, et pondérée par son poids nominal à cette date (selon les séries statistiques d'INSEE 2001); soit pour chaque année de référence comprise entre 1978 et 1997, et pour tout t du même intervalle :

$$\Phi_t = \frac{\frac{PD_t}{PD_{réf}}}{\alpha \frac{CI_t}{CI_{réf}} + \beta \frac{L_t}{L_{réf}} + \gamma \frac{CCF_t}{CCF_{réf}}} \quad (A.1)$$

où PD , CI , L et CCF désignent respectivement la production distribuée, les consommations intermédiaires, le travail, les consommations de capital fixe, en termes

réels (en francs constants ou en milliers d'emplois); α est égal à $\frac{CI_{réf}}{CI_{réf} + L_{réf} + CCF_{réf}}$ en termes nominaux, β et γ sont définis de façon identique pour les deux autres consommations, de sorte que l'on observe bien $\Phi_{réf} = 1$. Le fait d'ancrer les définitions d' α , β et γ dans l'année de référence rappelle la définition d'un indice de Laspeyres; on peut aussi utiliser une formulation de type Paasche en définissant les trois coefficients en t pour tout Φ_t ; le tableau A.1 donne un aperçu (dans le cas où 1984 est utilisée comme année de référence) des faibles divergences de résultat pour Φ_t suivant le choix de l'une ou l'autre méthode. Dans la suite de cet exercice de paramétrage nous décidons donc de n'utiliser que les indices construits selon la pondération nominale de l'année de référence (formulation de type Laspeyres).

	Laspeyres	Paasche
1978	0,959	0,958
1979	0,966	0,966
1980	0,972	0,973
1981	0,979	0,979
1982	0,988	0,988
1983	0,994	0,994
1984	1,000	1,000
1985	1,006	1,006
1986	1,011	1,012
1987	1,014	1,015
1988	1,024	1,025
1989	1,032	1,032
1990	1,035	1,036
1991	1,036	1,037
1992	1,044	1,045
1993	1,045	1,047
1994	1,050	1,053
1995	1,050	1,053
1996	1,052	1,055
1997	1,054	1,056

Tableau A.1 Coefficient de progrès technique observé, base 1 en 1984.

Ces calculs étant effectués, on cherche à obtenir des vingt séries Φ_t construites un jeu d'estimateurs fidèles et modélisables. La construction de ces estimateurs repose sur l'hypothèse que les générations successives de capital sont caractérisées par un coefficient propre croissant; on définit donc une fonction croissante de la formation brute de capital fixe cumulée. En outre, on contraint chaque estimateur à atteindre la valeur 1 en l'année de référence de la série qu'il reproduit, conformément à la normalisation opérée lors du calcul de Φ_t . Enfin, on leur fixe à chacun une limite asymptotique l_ϕ matérialisant le progrès technique potentiel sur la période couverte (fig. A.1).

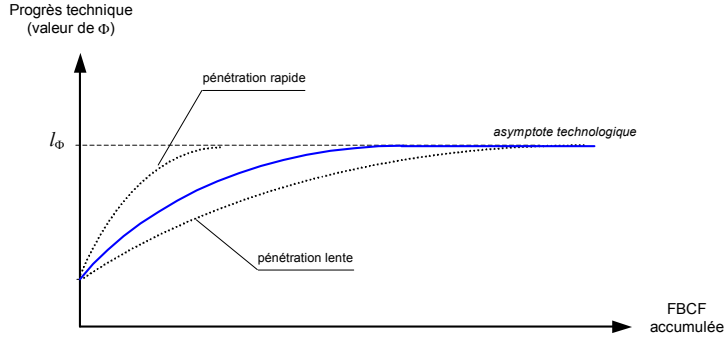


Figure A.1 Pénétration du progrès technique.

On définit ainsi vingt fonctions $\hat{\Phi}$:

$$\hat{\Phi}(IC_t) = l_\Phi + (1-l_\Phi) \left(\frac{IC_t}{IC_{réf}} \right)^{\gamma_\Phi} = 1 + l_\Phi \left(1 - \left(\frac{IC_t}{IC_{réf}} \right)^{\gamma_\Phi} \right) \quad (A.2)$$

où

- IC_t représente la formation brute de capital fixe en francs constants accumulée (hors dépréciation) en fin d'année t . L'INSEE fournit une série temporelle de valeurs de FBCF en francs constants comprenant les années 1978 à 1997 (INSEE 2001, tab. 2.402). IC_t est donc aisément calculable par accumulation dès lors que l'on détermine IC_{1977} ; pour ce faire on utilise le capital brut en francs constants installé en 1977 (série 2.602), que l'on ajuste par la divergence moyenne entre la FBCF et l'accumulation du capital fixe sur la période 1978-1997;
- $IC_{réf}$ désigne l'investissement cumulé en francs constants IC_t de l'année de référence propre à chacune des vingt séries Φ_t . De cette façon on a bien pour chacun des estimateurs correspondant $\hat{\Phi}_{réf} = 1$;
- γ_Φ traduit la courbure de la représentation graphique des différents $\hat{\Phi}$ (fig. A.1), soit la vitesse à laquelle le progrès technique pénètre. Étant donné la définition des $\hat{\Phi}$, une relation simple unit γ_Φ et l'élasticité du progrès technique (des différents $\hat{\Phi}$) à l'investissement brut réel (en francs constants) cumulé chaque année. Soit $\varepsilon_{\Phi IC}^t$ cette élasticité en l'année t , on a en effet :

$$\varepsilon_{\Phi IC}^t \equiv \frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial IC_t} \frac{IC_t}{\hat{\Phi}(IC_t)} = (1-l_\Phi) \gamma_\Phi \left(\frac{IC_t}{IC_{réf}} \right)^{\gamma_\Phi - 1} \frac{1}{IC_{réf}} \frac{IC_t}{\hat{\Phi}(IC_t)} \quad (A.3)$$

et notamment pour chacun des estimateurs, en l'année de référence :

$$\varepsilon_{\Phi IC}^{ref} = (1 - l_{\Phi}) \gamma_{\Phi} \quad (A.4)$$

Le paramétrage des vingt fonctions $\hat{\Phi}$ consiste alors à définir pour chacune d'entre elles des valeurs de l_{Φ} et γ_{Φ} en opérant une régression non linéaire par les moindres carrés sur les vingt séries de Φ_t formées à partir de l'équation (A.1) et la série d' IC_t tirée des données INSEE. La figure A.2 donne un exemple de la qualité des estimations effectuées, dans le cas où l'année 1984 est prise comme base ($\Phi_{1984} = 1$).

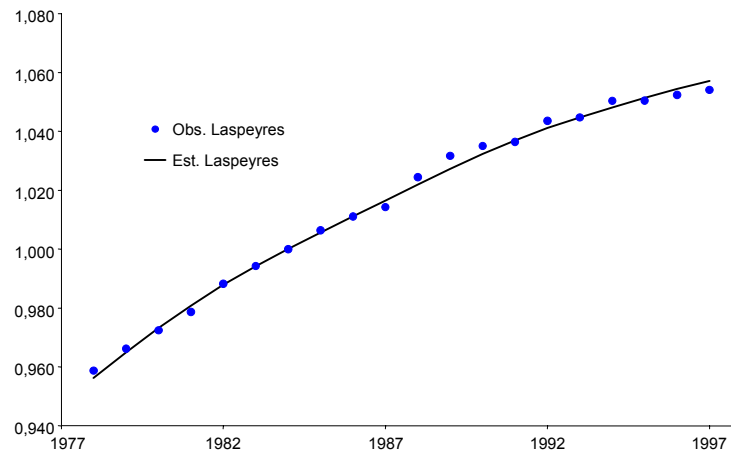


Figure A.2 Progrès technique Φ base 1 en 1984, observation et estimateur.

Le tableau A.2 résume quant à lui les paramètres propres à chacun des vingt estimateurs, soit

- l_{Φ} , la limite du coefficient de progrès technique $\hat{\Phi}$;
- plutôt que γ_{Φ} , $\varepsilon_{\Phi IC}^{ref}$ (plus facilement interprétable), c'est-à-dire l'élasticité du coefficient $\hat{\Phi}$ à l'investissement cumulé en l'année de référence, déduit pour chaque estimateur de l'équation (A.4), connaissant l_{Φ} et γ_{Φ} .

		l_{ϕ}	$\varepsilon_{\phi IC}^{ref}$
Année t de base de Φ ($\Phi_t = 1$)	1978	1,132	28,6%
	1979	1,124	29,2%
	1980	1,117	29,3%
	1981	1,121	27,8%
	1982	1,113	25,6%
	1983	1,117	24,7%
	1984	1,116	23,5%
	1985	1,107	21,1%
	1986	1,124	22,8%
	1987	1,162	22,3%
	1988	1,083	20,8%
	1989	1,068	19,1%
	1990	1,081	19,2%
	1991	1,104	19,1%
	1992	1,104	19,4%
	1993	1,099	18,2%
	1994	1,112	18,7%
	1995	1,092	17,0%
	1996	1,082	16,0%
	1997	1,086	15,9%

Tableau A.2 Résultats des régressions non linéaires sur les coefficients de progrès technique.

Sur les vingt années considérées, l'un comme l'autre des deux paramètres présentent une tendance à la baisse, plus marquée dans le cas de l'élasticité. On peut en effet se représenter qu'entre 1978 et 1997, aucune révolution technique n'ayant eu lieu⁹⁸, la pénétration de la dernière que notre économie ait connue (sans doute la microinformatique, consécutive à l'invention du transistor en 1948) atteint une relative saturation; en conséquence le potentiel qu'elle représente s'épuise progressivement (l_{ϕ} diminue) et devient plus difficile à réaliser ($\varepsilon_{\phi IC}^{ref}$ décroît).

Ces considérations ont leur importance dès lors que l'on définit les modalités de l'utilisation en 2030 de la paramétrisation de Φ établie sur la période 1978-1997. En effet IMACLIM utilise une fonction Φ similaire à celle définie par l'équation (A.2), selon le raisonnement suivant :

- l'année 2030 telle que définie dans la projection de référence (hors contrainte carbone) sert de base au coefficient de progrès technique : il y prend la valeur 1;
- toute projection dérivée par l'introduction d'une contrainte carbone est caractérisée par un investissement cumulé différent de celui observé dans la projection de référence.

⁹⁸ Ces considérations font l'hypothèse implicite que les innovations véritablement majeures sont de nature fondamentalement exogènes, et échappent par conséquent au cadre de notre représentation du progrès technique endogène.

Soient $IC_{réf}$ l'investissement cumulé de la projection de référence (son calcul est présenté ci-dessous) et IC_{der} le cumul ré-estimé en cas de contrainte carbone, la fonction Φ telle que définie dans IMACLIM s'écrit donc :

$$\Phi(IC_{der}) = l_{\Phi} + (1-l_{\Phi}) \left(\frac{IC_{der}}{IC_{réf}} \right)^{\gamma_{\Phi}} \quad (A.5)$$

L'utilisation des valeurs de l_{Φ} et γ_{Φ} estimées par régression sur la période 1978-1997 renvoie alors à une alternative :

- soit on considère que les innovations surgissant au cours des trois décennies qui nous séparent de 2030 ne sont pas assez en rupture avec l'état actuel des techniques pour modifier les tendances révélées entre 1978 et 1997, que l'on peut donc prolonger vers 2030. La série d'élasticités du tableau A.2 s'estime convenablement ($R^2 = 0,96$) par une fonction de forme $a e^t$ (a une constante, t l'année considérée), pour une élasticité projetée de 5,5% en 2030; la tâche est plus ardue pour l_{Φ} , qui s'il présente une tendance à la baisse, est beaucoup moins régulier. Faute d'une meilleure spécification, on prolonge la tendance observée linéairement;
- soit on fait l'hypothèse qu'une rupture technologique survient d'ici à 2030, et rompt la tendance au ralentissement révélée dans les séries disponibles; sous cette hypothèse, l'élasticité et la limite peuvent être choisies supérieures aux valeurs proposées ci-dessus.

Soulignons que le premier des termes de l'alternative est, plus que le second, compatible avec les différents éléments tendanciels utilisés dans la projection des équilibres de 1998 à 2030 (cf. annexe IV.2).

Le calcul de $IC_{réf}$ repose sur l'hypothèse simple que l'investissement annuel en francs constants croît linéairement entre 1998 et 2030⁹⁹. Sa valeur en 1997 est tirée de l'INSEE, et en lui appliquant sur 33 ans la croissance annuelle de l'investissement réel g_{Qk} déterminée entre 1998 et 2030 (variable Q_f de notre projection, cf. annexe IV.2) on l'obtient en 2030¹⁰⁰; l'hypothèse de croissance linéaire entre les deux années permet alors de définir l'investissement cumulé en francs constants

⁹⁹ Hypothèse fruste mais étayée par l'évolution de la FBCF entre 1978 et 1997 : une régression linéaire permet d'obtenir un ajustement satisfaisant (R^2 de 0,933).

¹⁰⁰ La différence de base (base 1 : en 1995 pour les séries « réelles » de l'INSEE, en 1998 pour notre calcul de Q_f) rend impossible l'emploi de la valeur Q_f en elle-même plutôt que celui de sa croissance relative.

$$IC_{réf} = IC_{1997} + 33 \left(\frac{1}{2} (IC_{1997} - IC_{1996}) (1 + (1 + g_{Qk})^{33}) \right) \quad (A.6)$$

IC_{der} est calculé de manière semblable, mais sur la base de l'investissement réel dérivé en 2030, soit : le total ré-estimé de FBCF Q_k (lié aux variations de revenu disponible et de prix), diminué d'une proportion $\tau_{év}$ de la hausse des investissements énergétiques intermédiaire Q_{kEi} (offre et demande) et final Q_{kEc} . $\tau_{év}$, l'une des principales variables de contrôle d'IMACLIM, symbolise le taux d'éviction entre investissement de productivité générale affectant le coefficient de progrès technique, et investissements spécifiquement énergétiques (cf. *supra*). En tirant des tableaux A.6 et A.14 (cf. annexe IV.2) Q_{k1998} la FBCF réelle de 1998 cohérente avec notre mise en équations du TES 1998, on peut donc définir la croissance annuelle de l'investissement réel dérivé

$$g_{Qk}^{réf} = \left(\frac{Q_k - \tau_{év} (Q_{kEi} - Q_{kEi0} + Q_{kEc})}{Q_{k1998}} \right)^{\frac{1}{32}} - 1 \quad (A.7)$$

En définissant alors les paramètres

$$\Phi_1 \equiv IC_{réf} \quad (A.8)$$

$$\Phi_2 \equiv IC_{1997} \quad (A.9)$$

$$\Phi_3 \equiv IC_{1997} - IC_{1996} \quad (A.10)$$

$$\Phi_4 \equiv Q_{k1998} \quad (A.11)$$

les équations (A.4), (A.5) et (A.6) permettent d'obtenir la formulation de Φ présentée à l'équation (60) :

$$\Phi = l_\Phi + (1 - l_\Phi) \left(\frac{\Phi_2 + 33 \frac{1}{2} \Phi_3 \left(1 + \left(\frac{Q_k - \tau_{év} (Q_{kE} - Q_{kE0} + Q_{kEi} + Q_{kEc})}{\Phi_4} \right)^{\frac{33}{32}} \right)}{\Phi_1} \right)^{\frac{\varepsilon_{\Phi IC}}{1 - l_\Phi}}$$

III.2. Définition et paramétrage des rendements décroissants Θ

Outre un coefficient de progrès technique endogène, IMACLIM applique aux consommations de facteurs primaires et secondaires des deux productions nationales

un coefficient Θ matérialisant l'hypothèse classique de rendements décroissants¹⁰¹ : une expansion des volumes produits a un effet inflationniste. La spécification de Θ repose sur trois hypothèses :

- la décroissance des rendements affecte l'ensemble de la production nationale de manière uniforme : un même coefficient Θ s'applique indistinctement aux consommations de facteurs dans la production des biens E et Q ;
- au vu des productions relatives en référence, l'impact sur Θ de l'évolution de la production et du prix du bien E est négligé : on définit comme seul argument de la fonction Θ le volume de production du bien Q , et l'on paramétrise Θ selon les différentes valeurs prises par le seul prix du bien Q ;
- la fonction liant coût marginal de production y' et volume produit Q est une fonction puissance de forme : $y'(Q) = \alpha Q^\beta$ avec α et β des paramètres.

La paramétrisation de la fonction y' se fait de manière simple. On commence par exploiter le fait que le niveau des prix (le coût marginal de production) est connu dans l'équilibre de référence : $y'(Q_0) = p_{Q0}$ (avec les notations d'IMACLIM, en indiquant d'un « 0 » les valeurs de référence des variables). D'où l'on tire la valeur du paramètre α en fonction de celle de β :

$$\alpha = \frac{p_{Q0}}{Q_0^\beta} \quad (\text{A.12})$$

On sait en outre que le coût marginal de production est par définition égal à la somme du coût moyen et des profits unitaires, et aussi que le coût moyen est égal à l'intégrale du coût marginal. En revenant à nouveau aux notations d'IMACLIM on peut donc poser :

$$\begin{aligned} & \frac{\int_0^{Q_0} \alpha Q^\beta dQ}{Q_0} + p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q = p_{Q0} \\ \Rightarrow & \frac{\left[\frac{\alpha}{\beta+1} Q^{\beta+1} \right]_0^{Q_0}}{Q_0} + p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q = p_{Q0} \\ \Rightarrow & \frac{\alpha}{\beta+1} Q_0^\beta + p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q = p_{Q0} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

¹⁰¹ La nécessité d'un tel ajustement provient du refus de l'utilisation d'une fonction de production standard, qui l'intégrerait, et de la volonté de raisonner sur une évolution des consommations de facteurs implicitement calibrée à production constante (cf. chap. IV).

En injectant (A.12) dans (A.13) il vient :

$$\begin{aligned} & \frac{p_{Q0}}{\beta+1} + p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q = p_{Q0} \\ \Rightarrow \quad \beta &= \frac{p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q}{p_{Q0} - p_{Qk0} k_{Q0} - p_{Q0} \pi_Q} \end{aligned} \quad (A.14)$$

En définissant alors Θ comme l'évolution du prix marginal de production due, par l'hypothèse de rendements décroissants, à l'évolution du volume produit d'une valeur de référence Q_0 à une valeur dérivée Q , on peut poser $\Theta = \frac{y'(Q)}{y'(Q_0)}$, soit, en injectant β l'équation (61) d'IMACLIM

$$\Theta = \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{\frac{p_{Qk0} k_{Q0} + p_{Q0} \pi_Q}{p_{Q0} - p_{Qk0} k_{Q0} - p_{Q0} \pi_Q}}$$

III.3. Reconstitution de l'investissement économiseur d'énergie en 2030

Comme indiqué par ailleurs, POLES ne donne malheureusement aucun détail quant à l'investissement de la demande d'énergie, qu'il s'agisse de demande intermédiaire ou de demande finale. On en est donc réduit à estimer cet investissement pour l'un et l'autre secteur institutionnel, selon une analyse coût/bénéfice que l'on détaille ici pour les émissions de carbone des consommations finales, mais qui s'applique de manière similaire pour celles des consommations intermédiaires.

On peut s'attendre de ménages soumis à une contrainte carbone, perçue comme durable, qu'ils réagissent à l'augmentation consécutive des prix de l'énergie en adaptant leur investissement dans l'équipement consommateur d'énergie, soit essentiellement l'habitat, les véhicules particuliers, l'électroménager. Le cadre général de l'analyse coût-bénéfice indique que leur décision d'investissement repose sur :

- une anticipation de l'évolution de la contrainte;
- la durée pendant laquelle ils échappent à tout ou partie du coût marginal de la contrainte, soit la durée de vie de l'investissement de remplacement. On nomme d_{kEc} la durée de vie de l'investissement énergétique des ménages;
- un taux d'actualisation, qui permet de traduire en termes actuels tout gain ou dépense encourus dans un futur plus ou moins éloigné. On sait que ce taux

d'actualisation, dans le cas spécifique de l'investissement énergétique, est l'objet d'une controverse : les mesures d'économies d'énergies observées historiquement paraissent ne faire sens que fondées sur des taux d'actualisation beaucoup plus élevés que ceux observés pour d'autres types de décision; une revue des études publiées (Train 1985, abondamment citée dans les publications dédiées à ce sujet) présente ainsi des taux majoritairement situés entre 20 et 50%, et parfois beaucoup plus élevés encore. Jaffe et Stavins (1994b) proposent une synthèse éclairante des justifications possibles de tels taux; la seule de ces justifications qui pourrait nous amener à rejeter l'utilisation d'une moyenne raisonnable des taux d'escompte estimés économétriquement sur des données historiques est celle développée par Hassett et Metcalf (1993), qui à l'aide d'un modèle simple démontrent comment l'incertitude sur les prix futurs de l'énergie et le coût de l'option de ne pas investir sont susceptibles de reproduire des schémas d'investissement proches de ceux observés, sur la base d'un taux d'escompte de 5%¹⁰². Dans le cadre de nos travaux nous nous en tiendrons à ces conclusions. On nomme τ_{actEc} le taux d'actualisation de l'investissement énergétique des ménages.

La figure A.4 illustre la manière dont ces différents éléments s'articulent : les ménages investissent à concurrence d'un coût marginal égal à l'actualisation de l'économie que leur investissement procure, étant donné t_c le coût de la contrainte carbone supporté en moyenne sur la durée de vie d_{kEc} de l'équipement considéré. L'investissement réalisé permet une réduction des émissions de carbone, que l'on peut estimer comme une fraction indéterminée τ_{EcK} des baisses de consommation δ_c et de « carbonisation » γ_c indiquées par POLES pour la contrainte t_c , hors effets d'équilibre général, difficilement anticipés. Partant d'un volume émis de $\gamma_{c0} E_{c0}$ MtC d'émissions (cf. les notations d'IMACLIM *supra*), les ménages espèrent donc un volume de $\tau_{EcK} \gamma_c (1-\delta_c) E_{c0}$ MtC, où γ_c et δ_c sont fonctions décroissante et croissante de t_c suivant POLES. Dans le lieu des couples de l'actualisation de t_c et de l'abattement réalisé (la différence des niveaux d'émissions avant et après investissement) on reconnaît l'un des principaux outils ou

¹⁰² L'ensemble des éléments explicatifs distingués par Jaffe et Stavins sont : du côté des imperfections de marché, (1) la qualité de bien public de l'information sur la disponibilité de technologies nouvelles, qui entrave sa production (2) un problème de principal/agent entre l'investisseur potentiel et le bénéficiaire de l'investissement; hormis les imperfections de marché, (3) l'argument de Hassett et Metcalf présenté ci-dessus, (4) des distinctions qualitatives entre les services procurés par l'investissement en place et son concurrent, (5) de multiples coûts d'adoption, (6) l'hétérogénéité des acteurs constituant l'agrégat dont on étudie la décision.

résultats de la modélisation des contraintes climatiques, la courbe de coût marginal d'abattement (CCMA).

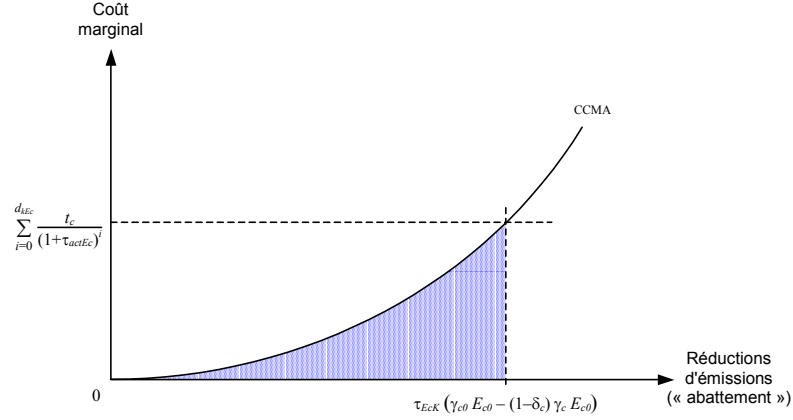


Figure A.4 Investissement énergétique des ménages : analyse coût-bénéfice

On sait que l'intégrale de la fonction liant niveau d'abattement et coût marginal donne la fonction d'investissement cumulé. Ainsi, sur la fig. A.4 la contrainte carbone t_c cause une masse d'investissement représentée par l'aire grisée sous la CCMA. Parce que les coûts marginaux d'abattement sont par construction croissants et convexes, on peut en outre poser que cette aire est une fraction κ_c comprise entre 0,5 et 0 de l'aire du rectangle dont les côtés sont l'actualisation de t_c et l'abattement réalisé. On obtient donc comme formulation de l'investissement causé par t_c quelconque :

$$\kappa_c \sum_{i=0}^{d_{KEc}} \frac{t_c}{(1+\tau_{actEc})^i} \tau_{EK} (\gamma_{c0} E_{c0} - (1-\delta_c) \gamma_c E_{c0}) \quad (A.15)$$

En développant la somme géométrique de l'actualisation, et en faisant l'hypothèse simplificatrice qu'une fraction $\frac{1}{d_{KEc}}$ de l'investissement est renouvelée annuellement, on aboutit bien à l'équation (22) d'IMACLIM :

$$Q_{KEc} = \frac{1}{d_{KEc}} \kappa_c \left(\frac{1+\tau_{actEc} - (1+\tau_{actEc})^{1-d_{KEc}}}{\tau_{actEc}} t_c \tau_{EK} (\gamma_{c0} E_{c0} - (1-\delta_c) \gamma_c E_{c0}) \right)$$

Comme indiqué ci-dessus le même raisonnement est appliqué concernant l'investissement de réduction des émissions intermédiaires de carbone, d'où la formulation de Q_{KEi} (équation 21), avec des notations équivalentes.

Dans le cas des émissions finales comme dans celui des émissions intermédiaires, POLES fournit des courbes de coût d'abattement dont les ratios κ sont univoques : sur cinquante points de la CCMA, κ_i affiche une moyenne de 0,413, et κ_c de 0,490; des écarts-types de respectivement 0,013 et 0,005 garantissent que l'utilisation de ces valeurs moyennes quel que soit le niveau de contrainte carbone n'entraîne qu'une légère approximation.

IV. Spécifications construites sur les résultats de POLES

La construction de formes spécifiques à partir des résultats de POLES concerne onze variables :

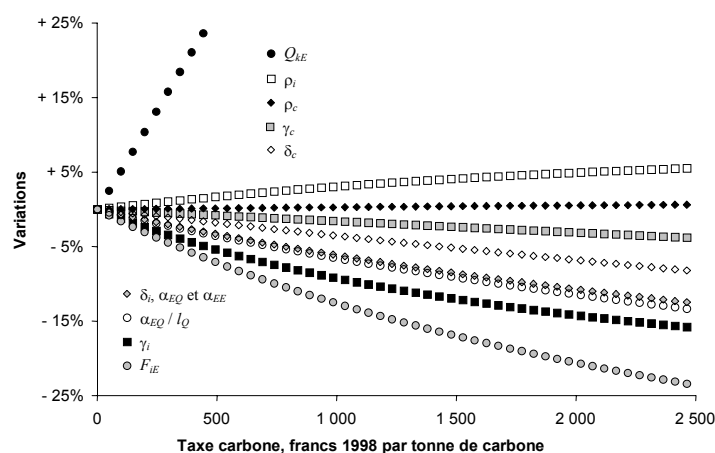
- γ_i l'évolution des émissions de carbone par unité physique d'énergie consommée comme bien intermédiaire;
- γ_c l'évolution de ces émissions pour la consommation finale;
- ρ_i l'évolution de l'assiette de TIPP par unité physique d'énergie consommée comme bien intermédiaire (la TIPP est une taxe forfaitaire et non *ad valorem*);
- ρ_c l'évolution de cette assiette pour la consommation finale;
- δ_i l'évolution de la consommation intermédiaire d'énergie réelle, hors effets d'équilibre général;
- δ_c l'évolution de la consommation finale d'énergie réelle, hors effets d'équilibre général;
- F_{iE} la consommation d'énergie brute importée dans la production d'énergie transformée;
- Q_{kE} le volume d'investissement en offre énergétique;
- α_{EQ} la consommation unitaire réelle d'énergie transformée dans la production du bien Q ;
- α_{EE} la consommation unitaire réelle d'énergie transformée dans la production du bien E ;

- $\frac{\alpha_{EQ}}{l_Q}$ le rapport entre cette consommation et celle de travail dans la même production.

On peut tirer de POLES une évaluation des variations de chacune de ces onze variables en fonction de la contrainte carbone imposée. Ainsi :

- l'évolution de γ_i et γ_c est obtenue en observant l'évolution du ratio entre MtC émises et consommations en millions de tonnes-équivalent-pétrole (MTEP);
- celle de ρ_i et ρ_c est obtenue de manière similaire, mais par le ratio entre consommations de carburants et consommations totales, toujours en MTEP;
- celles de δ_i et δ_c simplement par l'évolution des consommations intermédiaires et finales en MTEP;
- F_{iE} suit l'évolution des importations de pétrole, gaz et charbon;
- Q_{kE} varie comme la somme de l'investissement électrique productif et des autres investissements énergétiques. On commence par tirer de POLES la variation des investissements d'offre électrique, par le raisonnement décrit ci-dessus; à partir de séries détaillées sur l'investissement énergétique entre 1978 et 1999 on extrapole de cet investissement en capacité électrique le reste de l'investissement énergétique (production des autres énergies, distribution électricité comprise); en comparant le montant nominal total obtenu à la FBCF projetée en 2030 (cf. annexe IV.2, tab. A.9 cellule J7) on définit la part de Q_k consacrée à l'offre énergétique, soit en définitive Q_{kE} ;
- les variations d' α_{EQ} comme d' α_{EE} sont calquées sur celles du seul total des consommations intermédiaires d'énergie hors production électrique, suivant l'hypothèse implicite dans POLES d'une constance de la production hors énergie;
- enfin l'évolution du rapport $\frac{\alpha_{EQ}}{l_Q}$ est déterminée en utilisant les variations d' α_{EQ} et en calculant les consommations l_Q compatibles avec ces variations à production constante, sous la simple hypothèse d'égalité entre productivité marginale et coût marginal des facteurs (cf. chap. V).

Le graphique A.5 présente les variations obtenues en fonction d'un niveau de contrainte carbone exprimé en prix (d'une taxe carbone en francs 1998 par tonne de carbone émise).



Graphique A.5 Variations importées de POLES

POLES calcule ainsi :

- une forte hausse des investissements d'offre énergétique Q_{kE} . L'échelle du graphique A.1 ne permet pas de voir que la croissance quasi linéaire observée entre 0 et 500 francs par tonne se tasse progressivement, comme vers un pallier; à 2500 francs par tonne (l'horizon du graphique) l'augmentation est de +88%. Dans la mesure où toute contrainte suppose une diminution des consommations totales d'énergie, une telle évolution pourrait paraître surprenante; elle s'explique néanmoins de manière assez simple : la contrainte carbone rend progressivement compétitive un ensemble d'énergies dont la production demande des investissements lourds (en particulier le développement de filières nucléaires nouvelles), tandis que des filières à coût de production beaucoup plus faible sont abandonnées (centrales thermiques classiques);
- consécutivement, une baisse appuyée des consommations de combustibles fossiles bruts importés dans la production d'énergie transformée, F_{iE} .
- une hausse modeste de la base fiscale de la TIPP par unité d'énergie consommée, pour les ménages comme pour les entreprises. Cette hausse s'explique par la relative inélasticité des transports en comparaison d'autres postes de consommation énergétique. L'effet apparaît plus fort dans le cas des ménages que dans celui des entreprises, pour deux raisons principalement : un taux d'actualisation plus fort (cf. *supra*) et une part plus grande des dépenses consacrées aux transports.

- pour les mêmes raisons, des baisses de contenu carbone comme de consommation totale sensiblement plus fortes dans le cas des consommations intermédiaires (comparer γ_i et γ_c , δ_i et δ_c).
- une baisse du ratio $\frac{\alpha_{EQ}}{l_Q}$ légèrement supérieure à celle d' α_{EQ} , ce qui rend bien compte de la croissance de l_Q nécessaire au maintien de la production considérant la baisse d' α_{EQ} .

Le fait de représenter l'ensemble des variations sous une même échelle masque une caractéristique commune aux neuf séries : les trois séries croissantes sont concaves, les six décroissantes convexes, si bien que l'hypothèse de l'existence d'asymptotes à chacune des séries est plausible. En d'autres termes, les données de POLES s'intègrent aisément à un cadre de réflexion considérant qu'entre aujourd'hui et l'horizon de l'analyse, les techniques et comportements déterminant les grands traits quantitatifs et qualitatifs de la consommation d'énergie ont une évolution bornée. Une telle constatation n'est pas sans importance puisqu'elle permet de déterminer une forme générale applicable à l'ensemble des fonctions spécifiques. On utilise en effet une fonction de la forme

$$y = y_0 (a + \arctan(b + c x)) \quad (\text{A.16})$$

où y est l'une des onze variables que l'on cherche à caractériser, y_0 sa valeur en référence¹⁰³, x l'argument des variations de y et a , b et c des paramètres.

Le paramètre a est défini de façon à ce qu'en référence la forme spécifique donne exactement la valeur y_0 , soit

$$a = 1 - \arctan(b + c x_0) \quad (\text{A.17})$$

Les paramètres b et c sont alors calculés par régression non linéaire sur les moindres carrés des différences entre les variations données par POLES et celles calculées par l'équation (A.16). Ceci nécessite de faire le choix, pour chacune des séries, d'un argument susceptible de représenter dans IMACLIM la contrainte carbone croissante supposée par POLES :

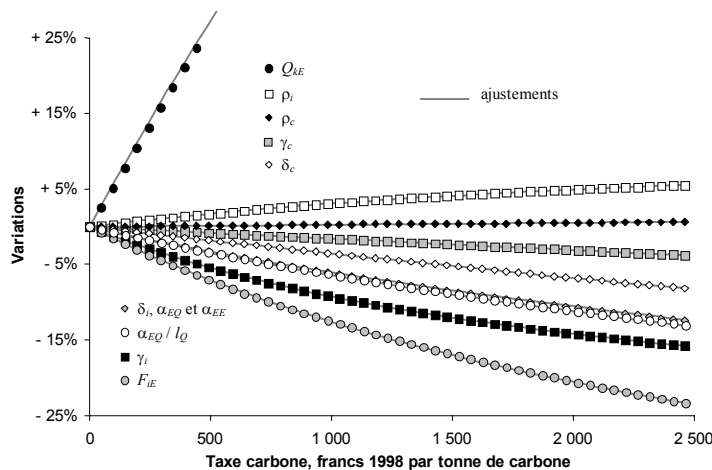
- pour γ_i , γ_c , ρ_i et ρ_c , on utilise simplement les taxes forfaitaires (les coûts marginaux des contraintes) t_i et t_c , dans la mesure où le niveau de détail d'IMACLIM ne permet pas de distinguer les véritables déterminants de l'évolution du contenu carbone des consommations, ni de la part des carburants

¹⁰³ Que l'on omet dans le cas des spécifications des deux coefficients δ , nuls en référence.

dans leur total (il faudrait pour cela distinguer non seulement les niveaux de prix relatifs des différents types d'énergie et le détail de leur contenu carbone, mais aussi disposer d'une représentation très fine et des préférences des consommateurs, et des fonctions de production);

- pour δ_i et δ_c , on retient aussi les taxes forfaitaires plutôt que les véritables prix, de manière à représenter une mesure de myopie (méconnaissance des effets d'équilibre général, cantonnement à l'information immédiatement disponible) des acteurs, dans la mesure où les deux coefficients n'interviennent que dans la définition des surcroûts d'investissement motivés par la contrainte pour la production d'une part, la consommation finale d'autre part;
- pour α_{EE} , on peut en revanche utiliser le niveau du prix intermédiaire du bien E dans la production p_{Ei} . Pour ce faire on reconstitue une série de p_{Ei} « selon POLES », soit à p_E fixe, mais intégrant sur une base γ_i décroissante une contrainte t_i croissante; puis on opère la régression en posant, suivant l'équation (A.17), $\alpha_{EE} = \alpha_{EE0} (a + \arctan(b + c p_{Ei(POLES)}))$; on intègre alors la définition de α_{EE} obtenue en lui donnant pour argument le p_{Ei} d'IMACLIM, quant à lui fondé sur un p_E variable;
- pour le ratio des facteurs $\frac{\alpha_{EQ}}{l_Q}$, on utilise tout naturellement le ratio de leurs prix $\frac{p_{Ei}}{p_{LQ}}$. Comme dans le cas d' α_{EE} on reconstitue des séries de l_Q et de p_{LQ} « selon POLES », en considérant d'une part une constance du coût du travail p_{LQ} , et d'autre part une intensité en travail variant de manière à conserver une production constante, étant données les variations d' α_{EQ} , et sous la simple hypothèse d'égalité entre coût marginal et productivité marginale (cf. chap. V);
- Q_{kE} est défini comme une fonction de $(t_i \gamma_{i0} E_{i0} + t_c \gamma_{c0} E_{c0})$: faute de distinction entre productions d'énergies transformées, le montant total de taxation *ex-ante* est le meilleur indicateur de la mesure anticipée de la contrainte, source du développement de techniques de production alternatives;
- F_{iE} est lui aussi défini comme une fonction du montant total de taxation *ex-ante*, $(t_i \gamma_{i0} E_{i0} + t_c \gamma_{c0} E_{c0})$, pour les mêmes raisons que Q_{kE} ; dans son cas, seule une désagrégation extensive des consommations intermédiaires d'énergie permettrait de modéliser les arbitrages décrits par POLES;

Le graphique A.6 permet une visualisation de la qualité des ajustements obtenus, qui paraît satisfaisante.



Graphique A.6 Qualité des ajustements sur les séries POLES

V. Reconstitution de l'investissement électrique productif en 2030

POLES fournit un luxe de détail concernant le parc de production électrique, qu'il s'agisse de filières conventionnelles ou de technologies nouvelles clairement identifiées, « renouvelables » ou non, dont le développement est plausible à l'horizon projeté. La valorisation des parcs installés en 2029 et 2030 permet de définir l'augmentation nominale réalisée courant 2030. Mais ce montant d'investissement doit être complété du montant nécessaire au remplacement des installations arrivant en fin de vie en 2030; or POLES ne fournit pas ce type d'information de manière explicite (bien que chacune des technologies qu'il représente soit caractérisée par une durée de vie). On détermine donc une règle simple de calcul permettant de passer du montant net d'augmentation du parc au montant brut d'investissement :

- en considérant que l'agrégat des différentes installations possède une durée de vie de trente ans, au cours desquels sa productivité est inchangée, on peut poser, en nommant K_t la capacité en place à l'année t (le stock), et I_t le montant total de capacité installée cette même année (le flux)

$$K_{2030} - K_{2029} = I_{2030} - I_{2000} \quad (\text{A.18})$$

où l'on retrouve en $K_{2030} - K_{2029}$ l'information donnée par POLES;

- en faisant en outre l'hypothèse simplificatrice que l'investissement de capacité électrique I_t croît entre 1997 (année de référence de POLES) et 2030 à un même taux constant τ que la capacité agrégée K_t elle-même, on obtient

$$I_{2030} = (1+\tau)^{30} I_{2000} \quad (\text{A.19})$$

En remplaçant alors I_{2000} dans l'équation (A.18) par son expression tirée de l'équation (A.19) on débouche sans difficulté sur

$$I_{2030} = (K_{2030} - K_{2029}) \quad (\text{A.20})$$

Comme indiqué ci-dessus, POLES fournit la série complète des capacités installées, et par conséquent non seulement $(K_{2030} - K_{2029})$, mais aussi τ , qui n'est que l'annualisation de la croissance observée entre K_{1997} et K_{2030} . L'équation (A.20) donne donc I_{2030} —qui à titre indicatif est supérieur de 164% à la hausse du capital installé dans la projection de référence 2030.

Les spécifications retenues peuvent paraître frustes, mais se révèlent robustes sur des données historiques tirées de Morsel (1996) concernant le parc électrique français entre 1923 et 1993. En appliquant à l'investissement annuel le taux de croissance de 5,6% suggéré par l'évolution des capacités (de 2426 à 107800 MW en 70 ans) puis en reconstituant la chronique de capacité installée, toujours sur la même hypothèse d'une durée de vie moyenne de trente ans, on obtient un estimateur satisfaisant des observations historiques (fig. A.3).

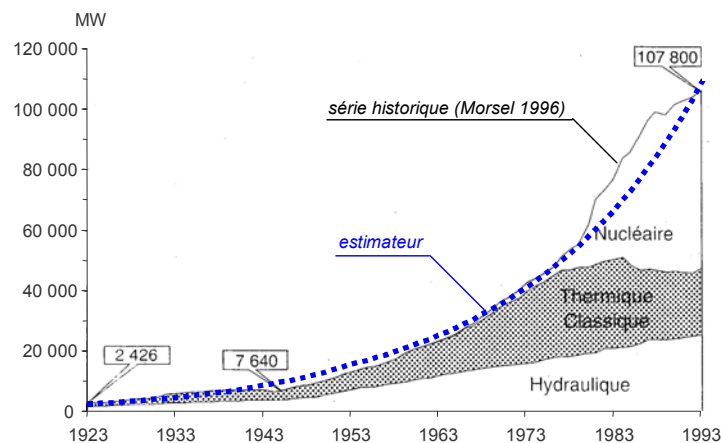


Figure A.3 Puissance électrique installée en France

ANNEXE IV.2

France 2030, trois secteurs : constitution de l'équilibre de référence

Cette annexe détaille la constitution d'un équilibre de référence français en 2030, par le couplage entre IMACLIM et le modèle *bottom-up* POLES de l'IEPE, sur la base de projections de croissance du PIB et de la productivité du travail proposées par le CEPII. Elle propose :

- le détail des sources utilisées et des traitements effectués pour la construction d'un tableau entrées-sorties pour une année de référence (1998),
- les modalités de la projection de ce tableau entrées-sorties à un horizon 2030 (celui de l'étude reproduite au chapitre VIII),
- les modalités de l'obtention des valeurs de référence des 61 variables et de certains des paramètres d'IMACLIM à partir de ce TES projeté.

L'économie française est découpée en trois produits :

- les énergies fossiles brutes F , dont on suppose par simplification (cf. *infra*) que l'ensemble des ressources est constitué d'importations;
- les énergies transformées E (produits pétroliers raffinés, coke, électricité de toute origine);
- le bien composite Q , « solde » agrégeant l'ensemble des productions non couvertes par les deux autres secteurs (et donc une très grande part de l'activité économique française).

I. Construction d'un TES à trois biens

L'année 1998 a été retenue pour la construction d'un TES à trois produits. Elle peut sembler éloignée, mais le changement de nomenclature opéré dans la comptabilité nationale française a retardé la mise à disposition de données macroéconomiques par l'INSEE, si bien qu'une matrice des consommations intermédiaires, même très agrégée (niveau E, 16 produits), n'est disponible aujourd'hui que jusqu'en 1999. Le TES de

1998, en revanche, est détaillé (niveau F, soit 39 produits) dans le *Rapport sur les Comptes de la Nation 2000* (INSEE 2001).

Toutefois, même pour l'année 1998 le niveau de détail affiché ne permet pas de distinguer entre produits fossiles non transformés et énergies transformées : la logique de désagrégation utilisée est transversale à cette problématique, et rassemble d'une part les produits pétroliers et les produits du charbon (FG1), d'autre part le gaz et l'électricité (FG2). Complication supplémentaire, l'agrégat FG2 intègre les activités de captage et de distribution d'eau. Pour aboutir au TES en trois biens désiré, on commence donc par agréger un TES en FG1, FG2 et solde (production composite); on dissocie ensuite les activités de l'eau d'FG2 pour les ré-agréger à la production composite; on ré-agrège en deux produits, énergie et autre; enfin on scinde le produit énergie en nos secteurs *E* et *F*.

Commençons par décrire la manière dont est construit le premier TES en composite, FG1 et FG2.

1.1. Consommations intermédiaires

Le *Rapport sur les Comptes de la Nation 2000* (RCN 2000 ci-après, INSEE 2001) fournit la matrice des consommations intermédiaires au niveau F. On extrait de son agrégation totale les secteurs FG1 et FG2, corrigés des transferts de produits (pour passer d'une logique par branche à une logique par produit), pour disposer d'une matrice à trois produits.

1.2. Partage de la valeur ajoutée (VA)

Les *salaires bruts (SB)* d'IMACLIM correspondent aux « salaires et traitements bruts », tableau 1.202 du RCN 2000.

Les *charges sociales employeurs (CS)* correspondent aux « cotisations sociales à la charge des employeurs », tableau 1.202 du RCN 2000.

Les montants de *consommation de capital fixe (CCF)* sont utilisés tels quels, tirés du tableau 2.605.

L'ensemble des autres éléments de la valeur ajoutée sont agrégés dans les *profits nets* (PN) d'IMACLIM; pour les produits composite et FG2, mais pas pour FG1 (nous verrons pourquoi plus loin) on ajoute à ces *profits nets* le solde des « autres impôts produits » et « autres subventions sur produits », tirés du Tableau des Entrées-Sorties détaillées 1998 (tableau 4.21 du RCN 2000).

Malheureusement, le partage de la valeur ajoutée par produit n'est pas disponible dans la nouvelle nomenclature française. On trouve néanmoins le détail de la *CCF* par produit, tableau 2.605, ainsi que des « rémunérations des salariés » (somme des salaires et traitements bruts et des cotisations sociales employeurs), tableau 2.212. Ceci permet d'obtenir le détail des PN à partir des totaux de valeur ajoutée (tableau 4.21, corrigés comme indiqué ci-dessus des impôts et subventions sur produits pour le produit composite et FG2); puis on dissocie *SB* et *CS* par règle de trois selon le partage des totaux toutes branches, tiré du tableau 1.202.

1.3. Ressources en produits

Le détail des ressources en produits est donné par le TES détaillé 1998, tableau 4.21 du RCN 2000 :

- les importations d'IMACLIM agrègent les comptes « total imports », « impôt sur imports » et « subv sur imports »;
- les produits FJ0 (« commerce ») et FK0 (« transports ») étant agrégés au produit composite, les marges commerciales comme les marges de transport sont additionnées aux consommations intermédiaires de bien composite (selon qu'elles concernent les ventes de la production de bien composite, de bien FG1 ou FG2);
- la « TVA grevant les produits » est utilisée telle quelle;
- les « autres impôts pdts » et les « autres subv sur pdts » sont agrégés à la valeur ajoutée pour les biens composite et FG2 (et sont donc alloués aux profits nets d'IMACLIM); pour le bien FG1 ils sont maintenus distincts pour former le compte de taxe intérieure sur les produits pétroliers (TIPP) d'IMACLIM. On a en effet souhaité conserver une description explicite de cette fiscalité pour les interactions évidentes qu'elle aurait avec toute contrainte sur le carbone.

Notons que le traitement des autres impôts et subventions sur produits implique dans le cas des biens composite et FG2 une légère imprécision dans l'utilisation des termes de « valeur ajoutée ». Dans l'ensemble des exercices numériques, on a pris garde de rétablir l'exacte définition de la VA lorsqu'il s'agissait d'en discuter les évolutions.

I.4. Emplois

Le tableau se fait par simple agrégation, en dehors du « total var stocks » et du compte « objets de valeur » qui sont intégrés à la consommation finale des ménages.

Les éléments rassemblés permettent l'obtention d'un premier TES 1998 à trois produits (en milliards de francs courants) :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		CI										
3			Q	FG1	FG2	T	Mén.	AP	T	FBCF	X	Emp
4		Q	6 381	97	66	6 545	4 335	2 060	6 395	1 578	2 189	16 708
5		FG1	178	74	45	296	196	0	196	0	29	522
6		FG2	154	5	40	199	169	0	169	0	18	386
7		T	6 712	175	152	7 040	4 700	2 060	6 760	1 578	2 237	17 615
8		VA	SB	3 051	11	47	3 109					
9			CS	1 152	4	18	1 174					
10			PN	2 153	16	81	2 249					
11			CCF	1 140	6	56	1 202					
12			T	7 495	37	202	7 734	PD	Q	FG1	FG2	T
									14 207	213	354	14 774
13		M	1 911	107	2	2 020						
14		TVA	590	40	30	660						
15		TIPP	0	161	0	161						
16		Res	16 708	522	386	17 615						

Tableau A.3 TES 1998, première étape.

avec

CI les consommations intermédiaires,

CF les consommations finales

Mén. les ménages

AP les administrations publiques

FBCF la formation brute de capital fixe

<i>X</i>	les exportations
<i>Emp</i>	le total des emplois
<i>VA</i>	la valeur ajoutée
<i>SB</i>	les salaires et traitements bruts
<i>CS</i>	les cotisations sociales à la charge des employeurs
<i>PN</i>	les « profits nets »
<i>CCF</i>	la consommation de capital fixe
<i>M</i>	les importations
<i>TVA</i>	la taxe sur la valeur ajoutée
<i>TIPP</i>	la taxe intérieure sur les produits pétroliers
<i>Res</i>	le total des ressources

1.5. Correction du produit FG2, ré-agrégation de FG1 et FG2 et extraction d'un produit fossile F

Dans le tableau ci-dessus, d'une part *FG1* comme *FG2* comportent toujours des énergies non transformées, importées dans leur grande majorité; d'autre part *FG2* contient toujours les emplois et ressources de captage et distribution d'eau. L'utilisation de la base de données GTAP 5.0 permet d'isoler ces deux catégories de produits.

On commence par soustraire à *FG2* et ré-agrégier à *Q* le produit des activités de captage, de distribution et de traitement de l'eau. Côté emplois GTAP 5.0 fournit la masse des consommations de ce produit, divisées en consommations intermédiaires, consommations des ménages et exportations. Par règle de trois (sur la masse des consommations agrégées de gaz, d'électricité et d'eau selon GTAP 5.0) on ré-estime :

- la consommation de bien FG2 dans la production de bien FG2;
- le total de la consommation intermédiaire de bien FG2;
- la consommation de bien FG2 des ménages;
- les exportations de bien FG2,

étant entendu que la consommation d'eau des administrations publiques et de la *FBCF* est nulle. Les consommations finales de bien *Q* (agrégat qui récupère les montants

soustraits au produit *FG2*) sont recalculées sur la base des totaux précédents, celles d'*FG1* étant inchangées. Par exemple, dans le tableau ci-dessus, si la consommation de bien *FG2* par les ménages (cellule G6) est ré-estimée à 99, alors la consommation de bien *Q* par les ménages (G4) devient $G7-99-G5 = 4700-99-196 = 4405$. La consommation de bien *FG2* dans la production de bien *Q* est obtenue en soustrayant au total ré-estimé des consommations intermédiaires de bien *FG2* celles dues à la production d'*FG1* et d'*FG2* redéfini. Côté ressources, on recalcule par règle de trois sur les données de GTAP :

- la somme des consommations intermédiaires de la production de *FG2*;
- la consommation intermédiaire de bien *FG2* dans la production de bien *FG1*;
- les rémunérations brutes de la production de *FG2*;
- les importations de bien *FG2*.

Les deux premières valeurs permettent de compléter la matrice des consommations intermédiaires à partir du total des consommations intermédiaires de l'agrégation précédente (cellule F7 du tableau A.3), les consommations de bien *FG1* étant inchangées. La troisième permet de redéfinir les *SB* et *CS*, en dissociant l'un comme l'autre selon le partage des rémunérations brutes indiqué par GTAP (soit en faisant l'hypothèse que la répartition entre salaires et charges est la même dans les rémunérations brutes des activités du gaz, de l'électricité et de l'eau). De la quatrième et du total des importations (cellule F13 du tableau A.3) on tire les importations de bien *Q* eau comprise, celles d'*FG1* étant inchangées. Concernant la TVA, le partage se fait en appliquant aux importations et consommations finales d'eau (assiettes de la TVA) le taux calculé pour les importations et consommations finales de bien *FG2* eau incluse; la TVA grevant les produits *FG2* nouvellement définis est alors obtenue en soustrayant le résultat du calcul au total de TVA obtenu pour *FG2* eau incluse (cellule F14 du tableau A.3). Le déséquilibre restant (ressources en produit *FG2* trop fortes) est résorbé en diminuant la masse des *CCF* et des *PN* au *pro-rata* de leur valeur dans le tableau A.3 (cellules E10 et E11). On obtient au total un nouveau TES 1998 à trois bien, mais où l'agrégat *FG2* ne contient plus les activités de l'eau,

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	CI						CF			FBCF	X	Emp
3			Q	FG1	FG2	T	Ménages	AP	Total			
4	Q		6 437	100	34	6 571	4 405	2 060	6 465	1 578	2 190	16 805
5	FG1		180	74	42	296	196	0	196	0	29	522
6	FG2		134	1	37	172	99	0	99	0	17	289
7	T		6 751	175	113	7 040	4 700	2 060	6 760	1 578	2 237	17 615
8	VA	SB	3 052	11	46	3 109						
9		CS	1 153	4	17	1 174						
10		PN	2 179	16	54	2 249						
11		CCF	1 158	6	38	1 202		Q	FG1	FG2	T	
12		T	7 542	37	155	7 734	PD	14 293	213	268	14 774	
13	M		1 911	107	2	2 020						
14	TVA		601	40	19	660						
15	TIPP		0	161	0	161						
16	Res		16 805	522	289	17 615						

Tableau A.4 TES 1998, deuxième étape.

On peut alors achever la constitution du TES 1998 en agréant *FG1* et *FG2* en un unique bien énergie *E*,

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2	CI					CF			FBCF	X	Emp
3			Q	E	T	Ménages	AP	T			
4		Q	6 437	135	6 571	4 405	2 060	6 465	1 578	2 190	16 805
5		E	314	154	468	295	0	295	0	47	810
6		T	6 751	289	7 040	4 700	2 060	6 760	1 578	2 237	17 615
7	VA	SB	3 052	57	3 109						
8		CS	1 153	21	1 174						
9		PN	2 179	70	2 249						
10		CCF	1 158	43	1 202						
11		T	7 542	192	7 734	PD	Q	E	T		
12	M		1 911	109	2 020						
13	TVA		601	59	660						
14	TIPP		0	161	161						
15	Res		16 805	810	17 615						

Tableau A.5 TES 1998, troisième étape.

... puis en extrayant de ce bien *E* un secteur *F* nouvellement défini regroupant les produits de l'extraction d'énergies fossiles : charbons et combustibles solides, pétrole brut, gaz naturel. L'objectif étant de rendre lisible dans le TES les importations

agrégées de ces trois catégories de bien (la dépendance énergétique de la France) on procède à deux aménagements :

- la part de production nationale des énergies fossiles non transformées, qui en 1997 ne représente que 5% des ressources du secteur F nouvellement agrégé, est ignorée (demeure agrégée à la production de bien E). L'approximation est atténuée par le fait que l'on peut considérer que cette part ne fera que décroître d'ici 2030;
- les consommations de gaz naturel importé des ménages indiquées par GTAP ne sont pas désagrégées du secteur E. Elles représentent 6,6% des consommations de fossiles importées selon GTAP, mais il a été impossible de leur trouver une correspondance dans la comptabilité nationale française¹⁰⁴. En conséquence, on choisit de maintenir leur agrégation au secteur E (qui conserve d'ailleurs les activités de distribution de gaz naturel).

Notre secteur *F* se ramène donc à la masse des importations de fossiles à destination de la production, importations qui constituent malgré tout 88,7% des consommations de produits bruts selon GTAP. Pour optimiser la cohérence de l'exercice, on revient alors au RCN 2000 et on emprunte au tableau 4.609, désagrégé au niveau G en 114 produits, les montants exacts d'importations d'énergies brutes (comptes GG11 et GG12, soit « extraction de houille, lignite et tourbe » et « extraction d'hydrocarbures et services annexes »). On désagrège ces importations de l'agrégat *E* (constitué de la somme des agrégats *FG1* et *FG2*), on ampute la TVA perçue sur le bien *E* au *pro-rata* des montants sur lesquels elle est perçue—somme d'une fraction des consommations intermédiaires (donnée par GTAP) et des consommations finales hors exportations, d'où la part afférant au bien *F*—, on divise les consommations intermédiaires au *pro-rata* des indications de GTAP et l'on obtient enfin le TES 1998 tel qu'il doit être projeté :

¹⁰⁴ Le tableau 4.609 de la comptabilité nationale 2001 (INSEE 2000) donne le détail des importations en 114 postes; les importations de « production et distribution de combustibles gazeux et de chaleur » (poste GG2B) sont tout à fait négligeables en comparaison des importations de produits fossiles non transformés (2 millions contre environ 75 milliards).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	CI					CF			FBCF	X	Emp	
3			Q	E	F	T	Ménages	AP	T			
4		Q	6 437	135	0	6 571	4 405	2 060	6 465	1 578	2 190	16 805
5		E	302	81	0	383	295	0	295	0	47	725
6		F	13	73	0	86	0	0	0	0	0	86
7		T	6 751	289	0	6 914	4 700	2 060	6 760	1 578	2 237	17 615
8	VA	SB	3 052	57	0	3 109						
9		CS	1 153	21	0	1 174						
10		PN	2 179	70	0	2 249						
11		CCF	1 158	43	0	1 202						
12		T	7 542	192	0	7 734	PD	14 293	480	0	14 774	
13	M		1 911	35	75	2 020						
14	TVA		601	48	11	660						
15	TIPP		0	161	0	161						
16	Res		16 805	725	86	17 615						

Tableau A.6 TES 1998, version finale.

II. Projection du TES vers 2030

La projection du TES obtenu pour 1998 vers l'horizon temporel de l'étude se fait en combinant une projection de croissance du PIB et de la population active, tirée des travaux du CEPII, une projection exhaustive des marchés de l'énergie, tirée du modèle POLES, un jeu d'équations d'équilibres en termes réels et nominaux, et un jeu d'hypothèses simples. Le modèle POLES fonde lui-même ses projections de demande énergétique sur les croissances de PIB et de population estimées par le CEPII, ce qui garantit une certaine cohérence à l'approche¹⁰⁵.

II.1. Définition des variables

La nature des données fournies par le CEPII et POLES suggère une mise en équations simple du TES 1998 présenté au tableau A.6 :

¹⁰⁵ Il faut malgré tout regretter que POLES ne recoure pas à un modèle de croissance multisectoriel explicite pour articuler ses différentes projections.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		CI					CF + FBCF	X	Emp
3			Q	E	F	T			
4		Q	$p_Q \alpha_{QQ} Q$	$p_Q \alpha_{QE} E$	0	Σ	$p_Q (1+\tau_{TvaQ}) Q_f$	$p_Q Q_X$	Σ
5		E	$(p_E + tipp_{CI}) \alpha_{EQ} Q$	$(p_E + tipp_{CI}) \alpha_{EE} E$	0	Σ	$(p_E + tipp_{CF}) (1+\tau_{TvaE}) E_c$	$p_E E_X$	Σ
6		F	F_Q	F_E	0	Σ	0	0	Σ
7		T	$\Sigma = CI_Q$	$\Sigma = CI_E$	0	Σ	Σ	Σ	Σ
8		SB	$\frac{w_Q}{1+p} Q$	$\frac{w_E}{1+p} E$	0	Σ			
9		VA CS+ PN+ CCF	$\pi_Q p_Q Q$	$\pi_E p_E E$	0	Σ			
10		T	$\Sigma = VA_Q$	$\Sigma = VA_E$	0	Σ			
11		M	$\frac{p_Q}{1+\tau_{TvaQ}} Q_{IM} + p_Q Q_{IM}$	$\left(\frac{p_E + tipp_{CI}}{1+\tau_{TvaE}} - tipp_{CI} \right) E_{IM} + p_E E_{cM}$	$F_Q + F_E - T_{TvaF}$	Σ			
12		TVA	$\tau_{TvaQ} \frac{p_Q}{1+\tau_{TvaQ}} Q_{IM} + \tau_{TvaQ} p_Q Q_f$	$\tau_{TvaE} \frac{p_E + tipp_{CI}}{1+\tau_{TvaE}} E_{IM} + \tau_{TvaE} (p_E + tipp_{CF}) E_c$	T_{TvaF}	Σ			
13		TIPP	0	$tipp_{CI} (\alpha_{EQ} Q + \alpha_{EE} E) + tipp_{CF} E_c$	0	Σ			
14		Res	Σ	Σ	Σ	Σ			

Tableau A.7 Mise en équations du TES.

Le TES ainsi réduit est défini par les valeurs de vingt-huit variables, soit

- p_Q et p_E : prix du bien composite et de l'énergie,
- α_{XY} : consommation réelle de bien X dans la production d'un bien Y (quatre variables),
- Q et E : productions réelles de bien composite et d'énergie transformée,
- F_X : consommations intermédiaires nominales totales de bien F dans la production du bien X (deux variables),
- Q_f : emploi final réel (pour la consommation ou l'investissement) de bien Q ,
- E_c : consommation finale réelle de bien E ,
- $tipp_{CI}$ et $tipp_{CF}$, les montants de taxe intérieure sur les produits pétroliers prélevés sur les consommations intermédiaire et finale de bien E ,
- τ_{TvaX} : taux de TVA non déductible perçue sur les consommations finales hors exportations et les importations (deux variables); on notera que les importations de chacun des deux biens sont implicitement valorisées de manière à ce que les

prix des biens domestiques et importés soient identiques à la consommation finale comme à la consommation intermédiaire;

- X_x : exportations réelles de bien X (deux variables),
- w_X : coût salarial unitaire dans le secteur X (deux variables),
- ρ : croissance de la productivité du travail,
- π_X : taux d'excédent brut d'exploitation dans le secteur X (deux variables),
- X_{IM} : volume d'importations de bien X destinées à la consommation intermédiaire (deux variables),
- Q_{JM} : volume d'importations de bien Q destinées aux emplois finals (consommation finale et investissement),
- E_{cM} : volume d'importations de bien E destinées à la consommation finale,
- T_{TvaF} : TVA non déductible prélevée sur les importations d'énergie fossile.

II.2. Affectation des valeurs 1998

Pour l'année de départ 1998, où l'on suppose ρ nul, les valeurs des vingt-huit variables sont obtenues en utilisant :

- une normalisation des prix des biens E et Q : $p_Q = p_E = 1$;
- une définition comptable de la production distribuée de biens E et Q :
 $PD_X \equiv CI_X + VA_X \equiv p_X X$;
- les parts des importations aux prix de marché de bien E et Q dévolues à la consommation intermédiaire et à la consommation finale (tirées de GTAP 5.0);
- le partage des rentrées de TIPP entre prélèvements sur les consommations intermédiaires, $TIPP_{CI}$, et les consommations finales $TIPP_{CF}$ (tiré des consommations intermédiaires et finales de carburant de POLES).

Ainsi, ρ , p_Q et p_E sont fixés; le croisement des tab. A.6 et A.7 donne immédiatement les valeurs de F_Q , F_E et TVA_F ; la normalisation et la définition de la production distribuée permettent d'obtenir, toujours par croisement des tab. A.6 et A.7, Q et E donc α_{QQ} , w_Q , π_Q , α_{QE} , w_E et π_E , ainsi que E_x et Q_x . Puis,

- α_{EQ} , α_{EE} et $tipp_{CI}$ sont solution d'un système de trois équations,

$$(p_E + tipp_{CI}) \alpha_{EQ} Q = \text{tab. A.6 cellule C5} \quad (\text{A.21})$$

$$(p_E + tipp_{CI}) \alpha_{EE} E = \text{tab. A.6 cellule D5} \quad (\text{A.22})$$

$$tipp_{CI} (\alpha_{EQ} Q + \alpha_{EE} E) = TIPP_{CI} \quad (\text{A.23})$$

- τ_{TvaQ} , Q_{iM} , Q_{fM} et Q_f sont solutions de

$$\tau_{TvaQ} \frac{p_Q}{1+\tau_{TvaQ}} Q_{iM} + \tau_{TvaQ} p_Q Q_f = \text{tab. A.6 cellule C14} \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{p_Q}{1+\tau_{TvaQ}} Q_{iM} + p_Q Q_{fM} = \text{tab. A.6 cellule C13} \quad (\text{A.25})$$

$$p_Q (1+\tau_{TvaQ}) Q_f = \text{tab. A.6 cellules I4 + J4} \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{p_Q Q_{iM}}{p_Q Q_{iM} + p_Q (1+\tau_{TvaQ}) Q_{fM}} = \text{un pourcentage donné par GTAP} \quad (\text{A.27})$$

- enfin τ_{TvaE} , E_{iM} , E_{cM} , $tipp_{CF}$ et E_c sont solutions de

$$\tau_{TvaE} \frac{p_E + tipp_{CI}}{1+\tau_{TvaE}} E_{iM} + \tau_{TvaE} (p_E + tipp_{CF}) E_c = \text{tab. A.6 cel. D14} \quad (\text{A.28})$$

$$\left(\frac{p_E + tipp_{CI}}{1+\tau_{TvaE}} - tipp_{CI} \right) E_{iM} + p_E E_{cM} = \text{tab. A.6 cellule D13} \quad (\text{A.29})$$

$$(p_E + tipp_{CF}) (1+\tau_{TvaE}) E_c = \text{tab. A.6 cellule I5} \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{(p_E + tipp_{CI}) Q_{iM}}{(p_E + tipp_{CI}) E_{iM} + (p_E + tipp_{CF}) (1+\tau_{TvaE}) E_{cM}} = \text{donnée GTAP} \quad (\text{A.31})$$

$$tipp_{CF} E_c = TIPP_{CF} \quad (\text{A.32})$$

II.3. Hypothèses de projection

La projection à proprement parler s'opère par une modification des valeurs des vingt-huit variables. Certaines évolutions sont posées comme hypothèses, et notamment la majorité des variables énergétiques s'accordent sur la projection de référence (hors taxe carbone) du modèle énergétique POLES. Ainsi de :

- p_E le prix moyen de l'énergie; le fait de calquer l'évolution de ce prix sur celle décrite par POLES permet de maintenir le prix du bien composite à 1, $p_Q \equiv 1$,

POLES raisonnant implicitement en termes de prix relatifs (en dollars constants);

- α_{EQ} les consommations intermédiaires unitaires d'énergie dans le secteur composite (l'intensité énergétique de la production),
- E la production distribuée réelle d'énergie transformée,
- E_c la consommation finale réelle d'énergie transformée,
- E_{IM} et E_{CM} , les importations réelles d'énergie transformée,
- E_x les exportations réelles d'énergie transformée,
- F_Q , F_E et T_{TVAF} , les montants nominaux de consommations d'énergies fossiles importées,

L'extraction de POLES des taux de progression de chacune de ces variables pose de nombreuses difficultés, qu'il serait fastidieux de détailler ici. Soulignons néanmoins le cas extrême des évolutions de balances commerciales, autant nominales que réelles : POLES ne projète en 2030 que des soldes exportatoires, qui pis est agrégés par catégories de produits pour charbonnages et produits pétroliers, donc regroupant des biens aux valorisations parfois différentes d'un ordre de grandeur; la désagrégation de ces soldes nécessite tout un jeu d'hypothèses simplificatrices—absence d'exportations de produits bruts, utilisation de certains coefficients techniques déduits des équilibres de 1998. Le tableau ci-dessous résume l'apport de POLES à la projection :

Variable	Évolution 1998-2030
p_E	+26,6%
α_{EQ}	-22,7%
E	+15,3%
E_c	+4,3%
E_{IM} et E_{CM}	+31,4%
E_x	-32,5%
F_Q , F_E et T_{TVAF}	+100,0%

**Tableau A.8 Évolutions 1998-2030 tirées
ou extrapolées de POLES.**

Quelques commentaires s'imposent :

- la croissance du prix relatif de l'énergie transformée p_E est principalement due au fort renchérissement des énergies primaires fossiles, qui transparaît dans le doublement de la facture des importations d'énergie (rappelons que F_Q et F_E sont des grandeurs nominales, cf. tableau A.7). Ce renchérissement, projeté par POLES au niveau mondial, s'explique simplement par la raréfaction des ressources naturelles considérées;
- la croissance de p_E occasionne des économies d'énergie transformée dans la production, qui se traduisent par une baisse de la consommation unitaire α_{EQ} . On peut noter une élasticité-prix implicite légèrement inférieure à 1;
- malgré ces économies, la croissance de l'activité générale (la croissance envisagée du PIB est de 80%) et le maintien de la consommation d'énergie des ménages E_c provoque une légère hausse de la production d'énergie transformée E ;
- la faible croissance de la consommation d'énergie des ménages E_c s'explique par la saturation du taux d'équipement énergétique des ménages et la faiblesse de la projection de croissance démographique, les hausses de taux d'utilisation étant partiellement compensées par les économies suscitées par la hausse de p_E ;
- les évolutions des balances d'énergie transformée, les plus « fragiles » au sens où leur calcul a nécessité certaines hypothèses exogènes, ont le mérite de ne pas choquer : les importations de produits raffinés et cokéfiés ou d'électricité augmentent tandis que les exportations baissent, ce qui suppose un déclin relatif des industries nationales de transformation de l'énergie, déclin compréhensible si l'on considère l'évolution nationale du coût de leurs matières premières, les énergies primaires.

Outre les évolutions dictées par POLES, le CEPPI fournit une hypothèse de croissance du PIB par tête que l'on utilise comme approximation de ρ .

Quatre autres variables, les taux de TVA effectifs et de profit des secteurs Q et E — τ_{TvaQ} et τ_{TvaE} , π_Q et π_E , conservent en 2030 leur valeur de 1998, faute de pouvoir fonder en raison toute autre hypothèse.

L'évolution de la balance commerciale de bien Q est fixée selon des hypothèses les plus neutres possibles pour pallier l'absence de représentation du commerce international, difficilement modélisable :

- les volumes importés Q_{iM} et Q_{fM} évoluent comme les consommations auxquelles ils sont dévolus, $(\alpha_{QQ} Q + \alpha_{QE} E)$ et Q_j ;

- le volumes exporté Q_x évolue comme la production distribuée Q .

L'évolution de la TIPP unitaire sur les consommations finales $tipp_{CF}$ est donnée par l'évolution de son assiette E_c et celle du montant total prélevé $TIPP_{CF}$, tiré de la projection de consommation finale de carburant de POLES.

L'évolution d' α_{QE} —la consommation unitaire de bien composite dans la production d'énergie transformée—est calculée par application sur trente-deux ans du taux annuel moyen d'évolution observé entre 1978 et 2000 sur des séries tirées des tableaux 2.105 et 2.102 du RCN 2000 (production et consommation intermédiaire par branche en volume).

Restent sept variables : w_Q , w_E , α_{QQ} , α_{QE} , $tipp_{CI}$, $tipp_{CF}$, Q et Q_f . Leurs valeurs sont déterminées par résolution d'un système linéaire de sept équations. Deux équations s'appliquent à chacun des deux secteurs productifs :

- équation comptable de formation des prix,

$$p_Q = p_Q \alpha_{QQ} + (p_E + tipp_{CI}) \alpha_{EQ} + \frac{F_Q}{Q} + \frac{w_Q}{I+\rho} + \pi_Q p_Q \quad (A.33)$$

$$p_E = p_Q \alpha_{QE} + (p_E + tipp_{CI}) \alpha_{EE} + \frac{F_E}{E} + \frac{w_E}{I+\rho} + \pi_E p_E \quad (A.34)$$

- équation physique d'égalité emplois-ressources,

$$Q + Q_{iM} + Q_{fM} = (\alpha_{QQ} Q + \alpha_{QE} E) + Q_f + Q_x \quad (A.35)$$

$$E + E_{iM} + E_{cM} = (\alpha_{EQ} Q + \alpha_{EE} E) + E_c + E_x \quad (A.36)$$

Une équation comptable donne le détail des recouvrements de TIPP intermédiaire, le total $TIPP_{CI}$ étant tiré de la projection de POLES :

$$tipp_{CI} (\alpha_{EQ} Q + \alpha_{EE} E) = TIPP_{CI} \quad (A.37)$$

Une équation fixe le rapport entre consommations intermédiaires et valeur ajoutée pour le secteur composite. On s'aperçoit en effet que les hypothèses retenues, si elles définissent l'évolution de la valeur ajoutée (par celle du PIB et la constance des taux de TVA), ne contraignent en aucune façon celle de la consommation intermédiaire de bien composite et sont donc compatibles avec une infinité de projections considérant telle ou telle croissance du secteur Q par son autoconsommation. En conséquence, toute projection nécessite une hypothèse en la matière, sous la forme d'un coefficient r_Q tel que :

$$\frac{CI_{Q, 2030}}{VA_{Q, 2030}} = r_Q \frac{CI_{Q, 1998}}{VA_{Q, 1998}} \quad (A.38)$$

avec des notations triviales. Le coefficient r_Q est estimé à partir de l'évolution annuelle observée entre 1978 et 2000 du ratio en question (consommations intermédiaires et valeurs ajoutées en prix courants, tableaux 2.104 et 2.201 du RCN 2000).

Enfin, une équation centrale de croissance du PIB, paramètre g provenant du CEPII :

$$\begin{aligned}
 PIB_{1998} (1+g) = & \left(\frac{w_Q}{1+\rho} + \pi_Q p_Q \right) Q + \left(\frac{w_E}{1+\rho} + \pi_E p_E \right) E \\
 & + \tau_{TvaQ} \left(\frac{p_Q}{1+\tau_{TvaQ}} Q_{iM} + p_Q Q_c \right) \\
 & + \tau_{TvaE} \left(\frac{p_E}{1+\tau_{TvaE}} E_{iM} + p_E E_c \right) + T_{TvaF}
 \end{aligned} \quad (A.39)$$

La résolution simultanée des sept équations permet ainsi d'obtenir les valeurs des variables manquant encore.

Il ne reste plus qu'à scinder les agrégats d'emplois finaux et de profits nets : $(CF+FBCF)$ est partagé par règle de trois sur les ratios observés en 1998; les CS des deux secteurs sont tirés des agrégats $(CS+PN+CCF)$ en appliquant aux CS_{1998} des croissances identiques à celles calculées pour les SB (égaux respectivement à $w_Q Q$ et $w_E E$); PN et CCF sont ensuite dissociés selon leur ratio en 1998.

On obtient en définitive un TES en 2030 de même format que celui de 1998 (tab. A.6) :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		CI					CF			FBCF	X	Emp
3			Q	E	F	T	Mén.	AP	T			
4		Q	10 742	141	0	10 883	8 019	3 750	11 769	2 873	3 836	29 362
5		E	507	113	0	620	356	0	356	0	40	1 016
6		F	26	146	0	171	0	0	0	0	0	171
7		T	11 275	400	0	11 675	8 375	3 750	12 125	2 873	3 876	30 549
8		SB	5 893	104	0	5 997						
9		CS	2 226	39	0	2 265						
10		PN	3 682	97	0	3 779						
11		CCF	1 957	60	0	2 017						
12		T	13 757	301	0	14 058	PD	Q	E	F	T	
								25 032	702	0	25 733	
13		M	3252	58	149	3 459						
14		TVA	1078	60	22	1 160						
15		TIPP	0	197	0	197						
16		Res	29 362	1 016	171	30 549						

Tableau A.9 TES 2030 de référence.

III. Données macroéconomiques complémentaires projetées

Les données macroéconomiques complémentaires projetées sont les montants prélevés au titre de diverses fiscalités et versés en indemnités de chômage. Leurs valeurs sont tirées en 1998 des mêmes sources statistiques que celles ayant permis de constituer le TES; elles sont ensuite projetées vers 2030 au *pro-rata* de l'évolution de leur assiette, ou de ce qui s'en approche le plus, étant donné le niveau de détail du TES reconstitué. Sont concernés :

- les impôts à la production et sur les produits, hors TIPP (notés T_{prod} dans IMACLIM). En 1998, ils correspondent à la somme des « impôts sur la production » (compte D29 du Tableau Économique d'Ensemble, numéroté 4.31 dans le RCN 2000) et des « autres impôts pdts » (tableau 4.21), corrigée de la TIPP (cf. *infra*) et des « subventions » (compte D3 du TEE). T_{prod} est supposé croître entre 1998 et 2030 comme la somme des profits nets tels que définis lors de la projection ($\pi_Q p_Q Q + \pi_E p_E E$);
- l'impôt sur le revenu (T_{IR}) : tiré pour 1998 du tableau 4.31 du RCN 2001 (compte D51, part acquittée par les ménages); projeté en 2030 selon la croissance projetée des rémunérations brutes, $\frac{w_Q}{1+p} Q + \frac{w_E}{1+p} E$;
- l'impôt sur les sociétés (T_{IS}) : tiré pour 1998 du tableau 4.31 du RCN 2001 (compte D51, part acquittée par les sociétés financières et les entreprises non financières); projeté en 2030 selon la croissance des profits nets, $\pi_Q p_Q Q + \pi_E p_E E$;
- les cotisations sociales (T_{CS}) : tirées pour 1998 du tableau 4.31 du RCN 2001 (compte D61); projetées en 2030 selon l'évolution de CS (tab. A.7, cellule F9) donc de $\frac{w_Q}{1+p} Q + \frac{w_E}{1+p} E$;
- la masse d'impôts dont on considère qu'elle ne varie pas du fait d'une contrainte carbone (T_{fix}) : en 1998, se déduit de la somme des « impôts sur la production et les importations » (compte D2), des « impôts courants sur le revenu et le patrimoine » (compte D5) et des « cotisations sociales » (compte D61), corrigée des « subventions » (compte D3) et de l'ensemble des fiscalités détaillées ci-dessus, y compris la TVA; on fait l'hypothèse que le montant de 1997 connaît une croissance identique à celle du PIB jusqu'en 2030; soulignons

qu'au total T_{fix} ne représente en 1998 comme en 2030 qu'environ 2,6% de l'ensemble des prélèvements.

- la masse des versements d'assurance chômage (T_U) : elle n'est malheureusement pas détaillée en 1998 (les nouvelles nomenclatures ne donnent qu'un compte agrégé de « prestations de sécurité sociale autres que trsf. soc. en nature »). On a donc recours à une autre source statistique, en l'espèce le site des ASSÉDIC-UNÉDIC¹⁰⁶. La valeur tirée de cette source est projetée en 2030 en concordance avec l'évolution du PIB par tête, choix que l'on peut assimiler à celui d'un taux de chômage constant. La croissance obtenue est révisée en fonction du taux de chômage τ_U retenu dans le scénario de référence en 2030 (τ_U est l'une des variables de contrôle du modèle), au pro-rata du ratio entre τ_U et le taux observé en 1998 : si τ_U est fixé à la moitié de ce qu'il était en 1998, la croissance de T_U calculée sur celle du PIB est divisée elle-aussi par deux.

Le tableau A.10 détaille la valeur en 1998, le taux de croissance et la valeur en 2030 de chacun de ces montants. Il donne aussi les croissances des prélèvements de TVA et de TIPP, respectivement observée à taux constant en fonction de la progression des assiettes, et fixée par la croissance des consommations de carburant estimée par POLES.

	1998	crois.	2030
T_{fix}	105 903	80%	190 810
T_{prod}	412 538	74%	718 562
T_{IR}	699 274	93%	1 348 998
T_{IS}	204 269	68%	343 153
T_{CS}	1 746 153	93%	3 368 574
(TVA)	660 055	76%	1 159 780
(T_{TIPP})	161 187	22%	196 562
T (total)	3 989 379	84%	7 326 438
T_U	159 076	87%	297 749 ¹⁰⁷

Tableau A.10 Croissance des prélèvements et des versements d'allocation chômage, 1998-2030.

¹⁰⁶ Et plus précisément une page dédiée à la statistique de ce site, à l'adresse <http://www.assedic.fr/unistatis/index.php>

¹⁰⁷ À taux de chômage τ_U identique à celui de 1998, cf. *supra*.

Avec ces dernières considérations, le détail des modalités de projection vers 2030 est désormais donné. Les tableaux qui suivent présentent la synthèse des résultats de la projection.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		CI					CF			FBCF	X	Emp
3			Q	E	F	T	Mén.	AP	T			
4		Q	+67%	+5%		+65%	+82%	+82%	+82%	+82%	+75%	+75%
5		E	+68%	+40%		+58%	+20%		+20%		-15%	+40%
6		F	+100%	+100%		+100%						+100%
7		T	+67%	+39%		+65%	+78%	+82%	+82%	+82%	+73%	+73%
8		SB	+93%	+83%		+93%						
9		CS	+93%	+83%		+93%						
10		PN	+69%	+39%		+68%						
11		CCF	+69%	+39%		+68%						
12		T	+82%	+57%		+82%	PD	+75%	+46%		+73%	
13		M	+70%	+67%	+100%	+71%						
14		TVA	+80%	+23%	+100%	+76%						
15		TIPP		+22%		+22%						
16		Res	+75%	+40%	+100%	+73%						

Tableau A.11 Croissances nominales projetées, 1998-2030.

Variable	Croissance
Q production de bien Q	+75%
E production de bien E	+15%
α_{QQ} intensité du bien Q en bien Q	-5%
α_{QE} intensité du bien E en bien Q	-9%
α_{EQ} intensité du bien Q en bien E	-23%
α_{EE} intensité du bien E en bien E	-2%
Q_f emploi final de bien Q	+82%
E_c consommation finale de bien E	+4%
Q_{IM} importations de bien Q intermédiaire	+66%
$Q_{\mathcal{M}}$ importations de bien Q final	+82%
E_{IM} importations de bien E intermédiaire	+31%
E_{cM} importations de bien E final	+31%
Q_x exportations de bien Q	+75%
E_x exportations de bien E	-33%

Tableau A.12 Croissances réelles projetées, 1998-2030.

IV. État initial des variables

L'ensemble des grandeurs macroéconomiques projetées servent à la définition de l'état initial des 61 variables d'IMACLIM présentées ci-dessus. Le traitement opéré sur le TES 2030 est du même ordre que celui effectué sur le TES 1998 pour sa projection (tab. A.7), mais à un niveau de détail légèrement supérieur :

	Q	E	F
Q	$p_Q \alpha_{QQ} Q$	$p_Q \alpha_{QE} E$	0
E	$(p_E + \rho_I t_{TIPP}) \alpha_{EQ} Q$	$(p_E + \rho_I t_{TIPP}) \alpha_{EE} E$	0
F	$p_F (1 + \tau_{TVaF}) F_{IQ}$	$p_F (1 + \tau_{TVaF}) F_{IE}$	0

Tableau A.13 Résolution de l'état initial des variables, consommations intermédiaires.

	CF		FBCF	X
	Ménages	AP		
Q	$p_Q (1 + \tau_{TVaQ}) Q_c$	$p_Q (1 + \tau_{TVaQ}) Q_{pub}$	$p_Q (1 + \tau_{TVaQ}) Q_k$	$p_Q Q_{exp}$
E	$(p_E + \rho_c t_{TIPP}) (1 + \tau_{TVaE}) E_c$	0	0	$p_E E_{exp}$
F	0	0	0	0

Tableau A.14 Résolution de l'état initial des variables, emplois finals.

		Q	E	F
VA	SB + CS	$p_{LQ} L_Q$ $= w_Q (1 + \sigma_Q) l_Q Q$	$p_{LE} L_E$ $= w_E (1 + \sigma_E) l_E E$	0
	PN	Π_Q	Π_E	0
	CCF	$p_Q (1 + \tau_{TVaQ}) k_Q Q$	$p_Q (1 + \tau_{TVaQ}) k_E E$	0
M		$\frac{p_Q}{1 + \tau_{TVaQ}} Q_{IM} + p_Q Q_{ckM}$	$\left(\frac{p_E + \rho_I t_{TIPP}}{1 + \tau_{TVaE}} - \rho_I t_{TIPP} \right) E_{IM}$ $+ p_E E_{cM}$	$p_F (F_{IQ} + F_{IE})$
TVA		T_{TVaQ}	T_{TVaE}	T_{TVaF}
TIPP		0	T_{TIPP}	0

Tableau A.15 Résolution de l'état initial des variables, ressources en produits.

Le calcul des valeurs des différentes variables est assez aisé pour le bien Q :

- une normalisation des prix p_Q et p_E et la définition des productions distribuées $PD_Q \equiv CI_Q + VA_Q \equiv p_Q Q$ et $PD_E \equiv CI_E + VA_E \equiv p_E E$ permettent d'obtenir p_Q , p_E , Q et E . Immédiatement, le croisement des tableaux A.9 et A.13 donne alors α_{QQ} et α_{QE} , soit Q_i puisque $Q_i \equiv \alpha_{QQ} Q + \alpha_{QE} E$; le croisement des tableaux A.9 et A.14 donne quant à lui Q_{exp} ;
- p_{LQ} est lui aussi normalisé, le croisement des tableaux A.9 et A.15 donne donc L_Q , qui à son tour donne l_Q , Q étant connu;
- τ_{TvaQ} est calculé en divisant le montant total de TVA non déductible prélevée sur les ventes de bien Q par le montant total de ces ventes hors TVA, soit par résolution de l'équation :

$$\tau_{TvaQ} = \frac{T_{TvaQ}}{p_Q (1+\tau_{TvaQ}) (Q_c + Q_{pub} + Q_k) + p_Q Q_{iM} - T_{TvaQ}} \quad (A.40)$$

T_{TvaQ} est connu (cellule D14, tab. A.9 ci-dessus), les consommations finales nominales du dénominateur aussi (cellules G, H et J ligne 4, tab. A.9); $p_Q Q_{iM}$ est obtenu comme une proportion, tirée de GTAP 5.0¹⁰⁸, des importations (cellule D13 tab. A.9) TVA comprise, donc égal à quelque chose de la forme $x\%$ D13 $(1+\tau_{TvaQ})$; τ_{TvaQ} est en définitive l'une des racines d'une équation du second degré de type

$$\tau_{TvaQ} = \frac{A}{B + C \tau_{TvaQ}} \quad (A.41)$$

où A, B et C sont connus. Le choix de la racine à retenir est immédiat, l'une étant négative, l'autre positive et d'un taux plausible (de l'ordre de 7%). τ_{TvaQ} calculé, on obtient Q_c , Q_{pub} , Q_k en recoupant les tab. A.9 et A.14, ainsi que k_Q , Q_{iM} donc Q_{ckM} (en utilisant le pourcentage donné par GTAP) par les tab. A.9 et A.15;

- σ_Q est obtenu en affectant au bien Q une part des cotisations sociales totales T_{CS} égale à la part de CS versée par la production de bien Q (rapport des cellules C9 et F9, tab. A.9), et en divisant cette somme par la rémunération nette (somme de $SB+CS$ nette de la part de T_{CS} en question). σ_Q permet de calculer w_Q connaissant l_Q et Q , par croisement des tableaux A.9 et A.15;

¹⁰⁸ Le recours à GTAP est nécessaire dans la mesure où la comptabilité nationale française ne donne pas le détail des emplois des importations.

- les différents prix du bien Q sont donnés par p_Q et $1+\tau_{TvaQ}$, ainsi que le suggèrent les valorisations apparaissant dans les tableaux A.14 et A.15 : p_{Qi} est porté égal à p_Q , p_{Qck} et p_{Qpub} à $p_Q (1+\tau_{TvaQ})$ et p_{Qexp} à p_Q ; de cette manière, la mise en équations décrite par les tableaux A.9, 13, 14 et 15 respecte les hypothèses posées lors des définitions des notations pour les deux paramètres p_{QiM} et p_{QckM} : au tableau A.13 l'ensemble de la consommation intermédiaire de bien Q est valorisée au prix $p_{Qi} = p_Q$, et au tableau A.15 les importations de bien Q à usage de la consommation intermédiaire sont valorisées hors taxes de manière que, TVA comprise (les importations sont assujetties à la TVA), les deux valorisations sont bien égales. De même, les consommations finales sont valorisées à $p_{Qck} = p_Q (1+\tau_{TvaQ})$, et les importations à usage de la consommation finale à $p_{QckM} = p_Q$.

Dans le cas du bien F , le taux de TVA est plus simple à calculer puisqu'on a fait l'hypothèse que les importations constituent l'unique ressource en produits. τ_{TvaF} est donc simplement égal au rapport entre T_{vaF} , donné par la cellule E14 du tableau A.9, et la somme des importations de bien F nettes de TVA, tab. A.9 cellule E13. Connaissant τ_{TvaF} , une normalisation de p_F permet de calculer F_{iQ} et F_{iE} par croisement des tab. A.9 et A.13.

Le cas du bien E est rendu plus complexe par le surcroît de détail qu'occasionne la distinction de la TIPP. Les valeurs de la majorité des variables qui s'y rapportent sont obtenues par résolution d'un système d'équations :

- les « contenus carburants » des consommations intermédiaire et finale d'énergie transformée, ρ_i et ρ_c , sont obtenus en divisant les consommations intermédiaires et finales de carburants, projetées par POLES, par la masse des consommations intermédiaires et finales d'IMACLIM, E_i et E_c :

$$\rho_i = \frac{\text{cons. int. de carburants}}{E_i} \quad (\text{A.42})$$

$$\rho_c = \frac{\text{cons. finale de carburants}}{E_c} \quad (\text{A.43})$$

- en gardant à l'esprit qu' E_i est identiquement égal à

$$E_i \equiv \alpha_{EQ} Q + \alpha_{EE} E \quad (\text{A.44})$$

- la TIPP forfaitaire se calcule en divisant le total projeté de TIPP, T_{TIPP} (tab. A.10), par son assiette telle que définie par ρ_i et ρ_c , soit $\rho_i E_i + \rho_c E_c$:

$$t_{TIPP} = \frac{T_{TIPP}}{\rho_i E_i + \rho_c E_c} \quad (A.45)$$

- les tableaux A.13 et 14, croisés avec le tableau A.9, nous donnent :

$$(p_E + \rho_i t_{TIPP}) \alpha_{EQ} Q = 515 \quad (A.46)$$

$$(p_E + \rho_i t_{TIPP}) \alpha_{EE} E = 91 \quad (A.47)$$

$$(p_E + \rho_c t_{TIPP}) (1 + \tau_{TvaE}) E_c = 390 \quad (A.48)$$

- le taux de TVA τ_{TvaE} est quant à lui obtenu par un raisonnement identique à celui opéré pour le bien Q , soit en posant :

$$\tau_{TvaE} = \frac{T_{TvaE}}{(p_E + \rho_i t_{TIPP}) E_{iM} + (p_E + \rho_c t_{TIPP}) (1 + \tau_{TvaE}) E_c - T_{TvaE}} \quad (A.49)$$

Les huit équations ainsi définies permettent de déterminer les valeurs de ρ_i , E_i , ρ_c , E_c , t_{TIPP} , α_{EQ} , α_{EE} et τ_{TvaE} ; E_{iM} et E_{cM} se déduisent alors du pourcentage fourni par GTAP des importations à destination des consommations intermédiaires et finales. E_{exp} et k_E ne nécessitent que p_E , p_Q , τ_{TvaQ} , E et le croisement des tableaux A.9, 14 et 15. Restent les détails de la demande de travail, w_E , σ_E , p_{LE} , l_E , L_E . L_E est fixé à l'aide de L_Q , au *pro-rata* de la répartition de l'emploi entre les deux productions en 1998. Cela permet d'obtenir l_E , connaissant E , ainsi que p_{LE} en croisant les tableaux A.9 et A.14. σ_E est défini de manière similaire à σ_Q (cf. *supra*), et p_{LE} donne alors w_E . Enfin, comme pour Q , les différents prix des emplois du bien E , p_{Ei} , p_{Ec} et p_{Eexp} , se déduisent de ρ_i et ρ_c , t_{TIPP} , τ_{TvaE} , selon les valorisations implicites dans les tableaux A.13, 14 et 15 : $p_{Ei} = p_E + \rho_i t_{TIPP}$, $p_{Ec} = (p_E + \rho_c t_{TIPP}) (1 + \tau_{TvaE})$ et $p_{Eexp} = p_E$. Toujours comme dans le cas du bien Q , les prix des ressources

$$p_{EiM} = \frac{p_E + \rho_i t_{TIPP}}{1 + \tau_{TvaE}} - \rho_i t_{TIPP} \quad \text{et} \quad p_{EcM} = p_E \quad (A.50)$$

sont bien définis de façon à ce que les prix des emplois de provenance nationale et internationale soient identiques.

En ajoutant à ces calculs sur les trois productions les valeurs des différentes fiscalités et des versements d'assurance chômage du tab. A.10, ainsi que les profits totaux Π_Q et Π_E (cellules C10 et D10 du tab. A.9), on obtient les valeurs de référence de 51 des 61 variables du modèle. Rappelons que les trois taux de TVA, ainsi que t_{TIPP} , α_{QQ} , α_{QE} ou l_E , ne sont pas des variables mais des paramètres endogènes du modèle. Le fait que des

valeurs leur soient attribuées lors du calcul de l'équilibre de référence ne modifie pas leur statut, et de fait leur calibrage à l'instar des autres paramètres permet une manière de recouplement des calculs effectués. De la même manière ρ_i et ρ_c ne sont pas des variables mais des paramètres exogènes, dont les valeurs de référence sont ainsi déterminées. Les sept variables restant à fixer le sont comme suit :

- R_{cons} , le revenu consommé des ménages, est posé égal à la somme des consommations $p_{Qck} Q_c + p_{Ec} E_c$;
- R , le revenu disponible brut des ménages, est obtenu en appliquant au revenu consommé R_{cons} l'inverse de la propension à épargner $(1-r_c)$; r_c la propension à consommer est calculée en 1998 à partir du RCN 2000 et utilisée telle quelle en 2030;
- R_{fix} , la part du revenu disponible brut non explicitée par le modèle, est obtenue en soustrayant à R l'ensemble de ses éléments explicités, soit les salaires nets des deux productions $w_Q L_Q + w_E L_E$, les revenus du chômage T_U ainsi qu'une part $r_{\pi m}$ (calculée sur les statistiques de 1998 du RCN 2000) de l'excédent brut d'exploitation $\Pi_Q + \Pi_E + p_{Qck} (k_Q Q + k_E E) - T_{prod}$.
- U la population active au chômage (exprimée dans la même unité que l'emploi des deux productions L_E et L_Q) est obtenue à partir des valeurs de L_Q et L_E et d'un taux de chômage τ_U :

$$\tau_U = \frac{U}{L_Q + L_E + U} \text{ soit } U = \frac{\tau_U (L_Q + L_E)}{1 - \tau_U} \quad (\text{A.51})$$

avec τ_U l'une des variables de contrôle du modèle.

- w le salaire net moyen est calculé comme la moyenne des salaires des deux productions pondérés par le poids de chacune d'entre elles en termes d'emploi,

$$w = \frac{w_Q L_Q + w_E L_E}{L_Q + L_E} \quad (\text{A.52})$$

- Q_{kei} et Q_{kec} , les surcroûts d'investissement pour l'économie d'énergie intermédiaire et finale occasionnés par la contrainte carbone, sont par définition nuls dans l'équilibre de référence, soit en l'absence de contrainte carbone;
- Q_{ke} , la FBCF de l'offre énergétique est calibrée selon la projection de référence de POLES et certaines séries temporelles de l'INSEE, suivant des raisonnements décrits ci-dessus;

- Θ et Φ sont normés à 1 (les corrections de consommations de facteurs dues au progrès technique et aux rendements décroissants sont calculées en variation de l'équilibre de référence, cf. annexe IV.1).

V. Calibrage des paramètres endogènes

Les 61 variables étant déterminées dans l'équilibre de référence, et les valeurs des paramètres exogènes définies comme indiqué ci-dessus, on peut procéder au calibrage, qui consiste à résoudre les soixante et une équations du modèle, en fixant les variables aux valeurs que l'on vient de leur définir, et en faisant varier les paramètres endogènes.

ANNEXE VI.1

Résultat des tests et scénarios

Test 1						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	+0,27%	+0,68%	+1,37%	+2,06%	+2,75%	+3,45%
Consommation finale d'énergie	-0,05%	-0,12%	-0,23%	-0,34%	-0,44%	-0,53%
Émissions de carbone	+0,13%	+0,32%	+0,64%	+0,97%	+1,30%	+1,64%
Consommation des ménages	+0,30%	+0,74%	+1,48%	+2,22%	+2,97%	+3,71%
Travail unitaire dans la production	id.	id.	id.	id.	id.	id.
Créations d'emploi	76 802	192 192	385 011	578 467	772 568	967 327
Revenu disponible brut	-0,04%	-0,12%	-0,23%	-0,34%	-0,44%	-0,53%
Solde commercial (volume)	+2,04%	+5,13%	+10,31%	+15,55%	+20,84%	+26,20%
Taux de prélèvement sur le travail	-2,15%	-5,36%	-10,65%	-15,87%	-21,02%	-26,11%
Charges unitaires sur la production	-1,56%	-3,88%	-7,69%	-11,43%	-15,11%	-18,73%
Salaire moyen	id.	id.	id.	id.	id.	id.
Prix de production du bien Q	-0,62%	-1,53%	-3,04%	-4,51%	-5,96%	-7,38%
Facture d'énergie des ménages	+3,12%	+7,80%	+15,61%	+23,44%	+31,28%	+39,15%
Production de bien Q	+0,35%	+0,88%	+1,77%	+2,65%	+3,54%	+4,44%

Test 2						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	+0,09%	+0,22%	+0,45%	+0,67%	+0,90%	+1,13%
Consommation finale d'énergie	-0,02%	-0,05%	-0,10%	-0,15%	-0,20%	-0,25%
Émissions de carbone	+0,04%	+0,10%	+0,20%	+0,30%	+0,40%	+0,50%
Consommation des ménages	-0,07%	-0,19%	-0,38%	-0,57%	-0,76%	-0,96%
Travail unitaire dans la production	id.	id.	id.	id.	id.	id.
Créations d'emploi	27 236	68 194	136 733	205 622	274 869	344 478
Revenu disponible brut	-0,02%	-0,05%	-0,10%	-0,15%	-0,20%	-0,25%
Solde commercial (volume)	+1,28%	+3,21%	+6,44%	+9,71%	+13,01%	+16,34%
Taux de prélèvement sur le travail	-1,72%	-4,29%	-8,57%	-12,83%	-17,07%	-21,29%
Charges unitaires sur la production	-1,15%	-2,87%	-5,73%	-8,57%	-11,40%	-14,21%
Salaire moyen	id.	id.	id.	id.	id.	id.
Prix de production du bien Q	-0,23%	-0,59%	-1,17%	-1,75%	-2,33%	-2,91%
Facture d'énergie des ménages	+3,44%	+8,60%	+17,20%	+25,79%	+34,37%	+42,95%
Production de bien Q	+0,06%	+0,15%	+0,30%	+0,44%	+0,59%	+0,74%

Test 3						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	+0,09%	+0,21%	+0,41%	+0,60%	+0,78%	+0,95%
Consommation finale d'énergie	-0,01%	id.	+0,08%	+0,24%	+0,46%	+0,74%
Émissions de carbone	+0,04%	+0,11%	+0,26%	+0,44%	+0,64%	+0,86%
Consommation des ménages	-0,07%	-0,18%	-0,34%	-0,49%	-0,62%	-0,75%
Travail unitaire dans la production	id.	id.	id.	id.	id.	id.
Créations d'emploi	26 586	64 272	121 914	174 008	221 410	264 801
Revenu disponible brut	-0,01%	id.	+0,08%	+0,24%	+0,46%	+0,74%
Solde commercial (volume)	+1,24%	+3,00%	+5,65%	+8,03%	+10,17%	+12,11%
Taux de prélèvement sur le travail	-1,73%	-4,37%	-8,85%	-13,40%	-17,99%	-22,61%
Charges unitaires sur la production	-1,15%	-2,86%	-5,67%	-8,46%	-11,23%	-13,99%
Salaire moyen	+0,02%	+0,10%	+0,37%	+0,80%	+1,35%	+2,01%
Prix de production du bien Q	-0,23%	-0,55%	-1,04%	-1,49%	-1,89%	-2,26%
Facture d'énergie des ménages	+3,46%	+8,69%	+17,55%	+26,58%	+35,77%	+45,11%
Production de bien Q	+0,06%	+0,14%	+0,26%	+0,37%	+0,48%	+0,57%

Test 4						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-0,06%	-0,14%	-0,24%	-0,31%	-0,36%	-0,38%
Consommation finale d'énergie	+0,45%	+1,11%	+2,19%	+3,25%	+4,29%	+5,33%
Émissions de carbone	+0,17%	+0,43%	+0,86%	+1,30%	+1,75%	+2,21%
Consommation des ménages	-0,12%	-0,28%	-0,51%	-0,71%	-0,88%	-1,02%
Travail unitaire dans la production	id.	id.	id.	id.	id.	id.
Créations d'emploi	-27 731	-65 583	-120 091	-165 760	-204 319	-237 104
Revenu disponible brut	+0,45%	+1,11%	+2,19%	+3,25%	+4,29%	+5,33%
Solde commercial (volume)	-0,96%	-2,29%	-4,29%	-6,04%	-7,61%	-9,02%
Taux de prélèvement sur le travail	-2,28%	-5,66%	-11,18%	-16,55%	-21,79%	-26,91%
Charges unitaires sur la production	-0,83%	-2,12%	-4,37%	-6,75%	-9,22%	-11,79%
Salaire moyen	+0,93%	+2,30%	+4,57%	+6,80%	+9,01%	+11,21%
Prix de production du bien Q	+0,22%	+0,53%	+0,98%	+1,36%	+1,69%	+1,98%
Facture d'énergie des ménages	+4,39%	+11,01%	+22,12%	+33,35%	+44,72%	+56,23%
Production de bien Q	-0,13%	-0,31%	-0,57%	-0,79%	-0,98%	-1,14%

Test 5						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-1,61%	-3,58%	-6,04%	-7,82%	-9,17%	-10,22%
Consommation finale d'énergie	+0,04%	+0,14%	+0,41%	+0,77%	+1,19%	+1,65%
Émissions de carbone	+0,04%	+0,11%	+0,26%	+0,44%	+0,64%	+0,86%
Consommation des ménages	-0,03%	-0,08%	-0,15%	-0,21%	-0,27%	-0,32%
Travail unitaire dans la production	+0,10%	+0,26%	+0,56%	+0,83%	+1,07%	+1,25%
Créations d'emploi	49 691	122 919	235 210	331 978	413 918	483 213
Revenu disponible brut	+0,04%	+0,14%	+0,41%	+0,77%	+1,19%	+1,65%
Solde commercial (volume)	+1,09%	+2,55%	+4,53%	+6,07%	+7,38%	+8,37%
Taux de prélèvement sur le travail	-1,35%	-3,48%	-7,19%	-11,01%	-14,84%	-18,66%
Charges unitaires sur la production	-0,91%	-2,28%	-4,60%	-6,92%	-9,25%	-11,60%
Salaire moyen	+0,02%	+0,15%	+0,57%	+1,19%	+1,97%	+2,85%
Prix de production du bien Q	-0,14%	-0,34%	-0,61%	-0,84%	-1,04%	-1,21%
Facture d'énergie des ménages	+2,65%	+6,90%	+14,51%	+22,55%	+30,88%	+39,44%
Production de bien Q	+0,07%	+0,15%	+0,26%	+0,35%	+0,42%	+0,48%

Test 6						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-2,13%	-5,12%	-8,93%	-11,48%	-13,24%	-14,50%
Consommation finale d'énergie	+0,03%	+0,14%	+0,52%	+1,11%	+1,79%	+2,49%
Émissions de carbone	-3,28%	-7,42%	-12,37%	-15,53%	-17,57%	-18,90%
Consommation des ménages	-0,01%	-0,04%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%
Travail unitaire dans la production	+0,02%	+0,19%	+0,81%	+1,52%	+2,13%	+2,58%
Créations d'emploi	37 833	116 065	286 122	449 425	580 927	680 876
Revenu disponible brut	+0,03%	+0,14%	+0,52%	+1,11%	+1,79%	+2,49%
Solde commercial (volume)	+0,76%	+2,16%	+3,95%	+4,89%	+5,35%	+5,62%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,87%	-2,54%	-6,08%	-10,11%	-14,26%	-18,38%
Charges unitaires sur la production	-0,63%	-1,81%	-3,95%	-6,15%	-8,41%	-10,73%
Salaire moyen	+0,01%	+0,10%	+0,57%	+1,43%	+2,53%	+3,76%
Prix de production du bien Q	-0,07%	-0,22%	-0,40%	-0,46%	-0,49%	-0,51%
Facture d'énergie des ménages	+1,50%	+5,05%	+12,41%	+20,69%	+29,46%	+38,54%
Production de bien Q	+0,08%	+0,18%	+0,26%	+0,28%	+0,29%	+0,29%

Test 7						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-2,26%	-5,46%	-9,59%	-12,42%	-14,41%	-15,86%
Consommation finale d'énergie	-1,39%	-3,74%	-6,58%	-8,29%	-9,32%	-9,98%
Émissions de carbone	-3,28%	-7,42%	-12,37%	-15,53%	-17,57%	-18,90%
Consommation des ménages	+0,04%	+0,09%	+0,15%	+0,20%	+0,23%	+0,25%
Travail unitaire dans la production	+0,01%	+0,16%	+0,74%	+1,43%	+2,04%	+2,50%
Créations d'emploi	33 348	99 904	249 368	398 390	520 099	611 944
Revenu disponible brut	+0,05%	+0,15%	+0,48%	+0,93%	+1,42%	+1,88%
Solde commercial (volume)	+0,48%	+1,25%	+1,93%	+1,85%	+1,36%	+0,72%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,62%	-1,68%	-3,92%	-6,44%	-8,95%	-11,34%
Charges unitaires sur la production	-0,40%	-1,05%	-2,16%	-3,21%	-4,21%	-5,16%
Salaire moyen	+0,01%	+0,06%	+0,32%	+0,81%	+1,43%	+2,09%
Prix de production du bien Q	+0,02%	+0,05%	+0,15%	+0,31%	+0,48%	+0,65%
Facture d'énergie des ménages	+0,06%	+0,75%	+3,20%	+6,53%	+10,18%	+13,92%
Production de bien Q	+0,08%	+0,17%	+0,25%	+0,26%	+0,25%	+0,24%

Test 8						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-2,46%	-5,77%	-9,91%	-12,69%	-14,64%	-16,06%
Consommation finale d'énergie	-3,33%	-7,07%	-9,94%	-10,97%	-11,35%	-11,50%
Émissions de carbone	-7,29%	-16,20%	-26,48%	-33,33%	-38,16%	-41,68%
Consommation des ménages	+0,12%	+0,24%	+0,33%	+0,37%	+0,40%	+0,41%
Travail unitaire dans la production	+0,01%	+0,15%	+0,70%	+1,39%	+2,00%	+2,47%
Créations d'emploi	25 456	81 193	219 916	364 121	483 240	573 356
Revenu disponible brut	+0,05%	+0,15%	+0,43%	+0,82%	+1,24%	+1,64%
Solde commercial (volume)	+0,39%	+1,08%	+1,74%	+1,71%	+1,28%	+0,71%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,33%	-1,03%	-2,87%	-5,07%	-7,29%	-9,42%
Charges unitaires sur la production	-0,12%	-0,48%	-1,29%	-2,12%	-2,92%	-3,69%
Salaire moyen	id.	+0,03%	+0,21%	+0,59%	+1,09%	+1,64%
Prix de production du bien Q	+0,11%	+0,21%	+0,33%	+0,47%	+0,62%	+0,77%
Facture d'énergie des ménages	-1,89%	-2,99%	-1,63%	+1,18%	+4,36%	+7,59%
Production de bien Q	+0,07%	+0,16%	+0,22%	+0,22%	+0,20%	+0,18%

Scénario 1 : élasticités faibles, éviction forte						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-2,15%	-4,71%	-7,80%	-10,01%	-11,66%	-12,98%
Consommation finale d'énergie	-2,91%	-6,03%	-9,22%	-11,04%	-12,13%	-12,84%
Émissions de carbone	-4,79%	-10,64%	-18,06%	-23,65%	-28,06%	-31,68%
Consommation des ménages	+0,06%	+0,11%	+0,13%	+0,09%	+0,03%	-0,06%
Travail unitaire dans la production	+0,11%	+0,29%	+0,62%	+0,92%	+1,16%	+1,35%
Créations d'emploi	40 798	101 021	191 092	264 266	321 335	357 471
Revenu disponible brut	+0,05%	+0,15%	+0,35%	+0,58%	+0,81%	+0,99%
Solde commercial (volume)	+0,91%	+2,07%	+3,52%	+4,58%	+5,40%	+6,43%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,91%	-2,36%	-4,85%	-7,30%	-9,63%	-11,71%
Charges unitaires sur la production	-0,50%	-1,28%	-2,57%	-3,82%	-5,00%	-6,03%
Salaire moyen	+0,01%	+0,08%	+0,31%	+0,64%	+1,01%	+1,36%
Prix de production du bien Q	id.	-0,02%	-0,07%	-0,13%	-0,18%	-0,26%
Facture d'énergie des ménages	+0,08%	+1,13%	+4,28%	+8,28%	+12,62%	+17,06%
Production de bien Q	+0,06%	+0,14%	+0,21%	+0,25%	+0,27%	+0,26%

Scénario 2 : élasticités fortes, éviction forte						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-3,32%	-7,52%	-12,12%	-14,93%	-16,78%	-18,10%
Consommation finale d'énergie	-4,91%	-9,80%	-13,25%	-14,47%	-14,94%	-15,16%
Émissions de carbone	-8,42%	-18,15%	-28,68%	-35,43%	-40,12%	-43,51%
Consommation des ménages	+0,16%	+0,30%	+0,38%	+0,39%	+0,35%	+0,28%
Travail unitaire dans la production	+0,05%	+0,34%	+1,18%	+1,95%	+2,52%	+2,90%
Créations d'emploi	25 344	97 754	260 325	396 809	490 960	550 961
Revenu disponible brut des ménages	+0,06%	+0,19%	+0,51%	+0,89%	+1,25%	+1,55%
Solde commercial (volume)	+0,67%	+1,81%	+3,12%	+3,77%	+4,12%	+4,40%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,15%	-0,84%	-2,92%	-5,27%	-7,52%	-9,60%
Charges unitaires sur la production	+0,03%	-0,21%	-1,01%	-1,89%	-2,77%	-3,64%
Salaire moyen	id.	+0,03%	+0,25%	+0,66%	+1,14%	+1,62%
Prix de production du bien Q	+0,16%	+0,29%	+0,40%	+0,49%	+0,56%	+0,60%
Facture d'énergie des ménages	-2,82%	-4,22%	-2,30%	+1,39%	+5,54%	+9,77%
Production de bien Q	+0,06%	+0,11%	+0,09%	+0,03%	-0,03%	-0,08%

Scénario 3 : élasticités faibles, éviction faible						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-2,14%	-4,69%	-7,77%	-9,95%	-11,59%	-12,87%
Consommation finale d'énergie	-2,90%	-6,01%	-9,17%	-10,96%	-12,03%	-12,70%
Émissions de carbone	-4,78%	-10,62%	-18,02%	-23,60%	-28,00%	-31,58%
Consommation des ménages	+0,08%	+0,15%	+0,20%	+0,21%	+0,19%	+0,15%
Travail unitaire dans la production	+0,11%	+0,29%	+0,62%	+0,92%	+1,16%	+1,35%
Créations d'emploi	42 726	105 616	199 765	276 806	337 673	384 972
Revenu disponible brut	+0,05%	+0,15%	+0,35%	+0,59%	+0,83%	+1,06%
Solde commercial (volume)	+0,95%	+2,15%	+3,67%	+4,79%	+5,65%	+6,38%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,93%	-2,41%	-4,96%	-7,48%	-9,89%	-12,17%
Charges unitaires sur la production	-0,52%	-1,33%	-2,66%	-3,95%	-5,18%	-6,36%
Salaire moyen	+0,01%	+0,09%	+0,33%	+0,68%	+1,09%	+1,51%
Prix de production du bien Q	-0,02%	-0,06%	-0,15%	-0,24%	-0,33%	-0,42%
Facture d'énergie des ménages	+0,08%	+1,13%	+4,29%	+8,30%	+12,66%	+17,14%
Production de bien Q	+0,08%	+0,16%	+0,27%	+0,33%	+0,38%	+0,42%

Scénario 4 : élasticités fortes, éviction faible						
Taxe, FF/tC	200	500	1000	1500	2000	2500
Consommation int. d'énergie	-3,31%	-7,49%	-12,07%	-14,85%	-16,69%	-17,99%
Consommation finale d'énergie	-4,91%	-9,78%	-13,20%	-14,38%	-14,82%	-15,00%
Émissions de carbone	-8,42%	-18,13%	-28,63%	-35,37%	-40,04%	-43,42%
Consommation des ménages	+0,19%	+0,36%	+0,50%	+0,56%	+0,57%	+0,55%
Travail unitaire dans la production	+0,05%	+0,34%	+1,17%	+1,95%	+2,52%	+2,90%
Créations d'emploi	28 418	105 278	273 412	414 491	513 045	577 407
Revenu disponible brut	+0,06%	+0,18%	+0,51%	+0,90%	+1,28%	+1,60%
Solde commercial (volume)	+0,73%	+1,96%	+3,36%	+4,07%	+4,48%	+4,80%
Taux de prélèvement sur le travail	-0,18%	-0,92%	-3,08%	-5,52%	-7,86%	-10,02%
Charges unitaires sur la production	id.	-0,29%	-1,14%	-2,08%	-3,01%	-3,94%
Salaire moyen	id.	+0,03%	+0,28%	+0,72%	+1,24%	+1,76%
Prix de production du bien Q	+0,14%	+0,23%	+0,29%	+0,33%	+0,35%	+0,35%
Facture d'énergie des ménages	-2,83%	-4,24%	-2,31%	+1,40%	+5,57%	+9,83%
Production de bien Q	+0,08%	+0,15%	+0,18%	+0,16%	+0,13%	+0,11%

Bibliographie

- Aghion P. et P. Howitt (1998). *Endogenous Growth Theory*. MIT Press, Cambridge MA, États-Unis. 694 p.
- Armington P. (1969) « A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production ». *IMF Staff papers* **16** (1) : 159-78.
- Ascher W. (1978). *Forecasting – An Appraisal for Policymakers and Planners*. John Hopkins University Press, Baltimore, États-Unis. 239 p.
- Ascher W. (1990). « Beyond accuracy ». *International Journal of Forecasting* **5** : 469-484.
- Atkinson A.D. et J.E. Stiglitz (1976). « The Design of Tax Structure : Direct versus Indirect Taxation ». *Journal of Public Economics* (6) : 55-75.
- Babiker M.H., J.M. Reilly, M. Mayer, R.S. Eckaus, I. Sue Wing et R.C. Hyman (2001). *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Emissions, Sensitivities and Comparison of Results*. Massachusetts Institute of Technology. Joint Program on the Science and Policy of Global Change report n°71.
http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt71.pdf (accès juin 2002).
- Barker T., S. Baylis et P. Madsen (1993). « A UK Carbon/Energy Tax. The Macroeconomic Effects ». *Energy Policy* **21** (3) : 296-308.
- Barker T. et N. Johnstone (1993). « Equity and Efficiency in Policies to Reduce Carbon Emissions in the Domestic Sector ». *Energy and Environment* **4** (4) : 335-361.
- Baron R. et al. (1999). *A Preliminary Analysis of the EU Proposals on the Kyoto Mechanisms*. International Energy Agency.
<http://www.iea.org/new/releases/1999/eurpro/eurlong.htm> (accès janvier 2002).
- Baumol W.J. et W.E. Oates (1988). *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. 299 p.
- Bernardini O. et R. Galli (1993). « Dematerialization: Long Term Trends in the Intensity of Use of Material and Energy ». *Futures* **25** (4) : 431-448.
- Berndt E.R. et D.O. Wood (1985). « Energy Price Changes and the Induced Revaluation of Durable Capital in U.S. Manufacturing During the OPEC Decade ». MIT Energy Laboratory. Report 84-003.
- Bernstein P.M., W.D. Montgomery et T.F. Rutherford (1999a). « Global Impacts of the Kyoto Agreement: Results from the MS-MRT Model. » *Resource and Energy Economics* **21** : 375-413
- Bernstein P.M., W.D. Montgomery, T.F. Rutherford et G.F. Yang (1999b). « Effects of Restrictions on International Permit Trading: The MS-MRT Model ». *The Energy Journal* Special Issue *The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 221-256.
- Berrah N.E. (1983). « Energy and Development: The Tunnel Effect ». *Revue de l'Énergie* (356).
- Blanchard O. et P. Criqui (2000). « La Valeur du Carbone : un Concept Générique pour les Politiques Internationales et Nationales de Réduction des Émissions ». *Économie Internationale* **82** : 75-102.
- Bohi D.R. (1989). *Energy Price Shocks and Macroeconomic Performance*. Resources For the Future. Washington D.C., États-Unis.
- Böhringer C. (1998). « The Synthesis of Bottom-Up and Top-Down in Energy Policy Modeling ». *Energy Economics* **20** (3) : 233-248.

- Boisson P. et P. Criqui (1998). *Énergie 2010-2020. Les chemins d'une croissance sobre*. Commissariat général du Plan. La Documentation française, Paris. 536 p.
- Bollen J.C., A. Gielen et H. Timmer (1999). « Clubs, Ceilings, and CDM ». *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 177-206.
- Bovenberg A.L. (1999). « Green Tax Reform and the Double Dividend: An Updated Reader's Guide ». *International Tax and Public Finance* **6** : 421-443.
- Bovenberg A.L. et L.H. Goulder (2000). *Neutralizing the Adverse Industry Impacts of CO₂ Abatement Policies: What Does It Cost ?* Fondazione Eni Enrico Mattei. Nota di Lavoro 68.00. http://www.feem.it/web/attiv/_wp.html (accès juillet 2002).
- Bovenberg A.L. et R.A. De Mooij (1994a). « Environmental Levies and Distortionary Taxation ». *American Economic Review* **84** (4) : 1085-1089.
- Bovenberg A.L. et R.A. De Mooij (1994b). « Environmental Taxes and Labor-Market Distortions ». *European Journal of Political Economy* **10** : 655-683.
- Bovenberg A.L. et R.A. De Mooij (1996). « Environmental Taxation and the Double Dividend: The Role of Factor Substitution and Capital Mobility ». In C. Carraro et D. Siniscalco (éds.) *Environmental Fiscal Reform and Unemployment* : 3-52. Kluwer Academic Publishers, La Haye, Pays-Bas.
- Bovenberg A.L. et F. van der Ploeg (1994a). « Environmental Policy, Public Finance and the Labour Market in a Second-Best World ». *Journal of Public Economics* **55** (3) : 349-390.
- Bovenberg A.L. et F. van der Ploeg (1994b). « Environmental Policy, Public Goods and the Marginal Cost of Public Funds ». *The Economic Journal* **104** (423) : 444-454.
- Bovenberg A.L. et F. van der Ploeg (1996). « Optimal Taxation, Public Goods and Environmental Policy with Involuntary Unemployment ». *Journal of Public Economics* **62** (1-2) : 59-83.
- Bowles S. et R. Boyer (1995). « Wages, Aggregate Demand, and Employment in an Open Economy: A Theoretical and Empirical Investigation ». In *Macroeconomic Policy after the Conservative Era* : 147-162. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Burniaux J.-M., J.P. Martin, G. Nicoletti et J. Oliveira-Martins (1992). *GREEN - A Multi-Sector, Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO₂ Emissions: A Technical Manual*. OECD. Economics Department working paper n°116. <http://www.oecd.org/pdf/M00008000/M00008978.pdf> (accès juin 2002)
- Burniaux J.-M. et T. Truong (2002). *GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model*. Global Trade Analysis Project. Technical paper 16. http://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=923 (accès juin 2002)
- Carraro C. et A. Soubeyran (1996). « Environmental Taxation and Employment in a Multi-Sector General Equilibrium Model ». In C. Carraro et D. Siniscalco (éds.) *Environmental Fiscal Reform and Unemployment* : 73-93. Kluwer Academic Publishers, La Haye, Pays Bas.
- CCE—Commission des Communautés Européennes (1994). « Taxation, Emploi et Environnement : Réforme Fiscale pour Réduire le Chômage ». In *Économie Européenne*, rapport économique annuel. Bruxelles.

- CCE—Commission des Communautés Européennes (2000). *Livre Vert sur l'Établissement dans l'Union Européenne d'un Système d'Échange de Droits d'Émission des Gaz à Effet de Serre*. Bruxelles, mars.
- CEC—Commission of the European Communities (2001). *Communication from the Commission on the Implementation of the First Phase of the European Climate Change Program*. CEC COM (2001) 580 final.
- Chen X. (1994). « Substitutions of information for energy ». *Energy Policy* **22** (1) : 15-27.
- Chichilnisky G., G. Heal et D. Starett (1994). *International Emission Permits: Equity and Efficiency*. University of Columbia. Graduate School of Business Paper 94-03.
- Chiroleu-Assouline M. (2001). « Le Double Dividende. Les Approches Théoriques ». *Revue Française d'Économie* **16** (2) : 118-147.
- Considine T. (1989). « Estimating the Demand for Energy and Natural Resource Inputs: Trade-Offs in Global Property ». *Applied Economics* **21** : 931-945.
- Cooper A., S. Livermore, V. Rossi, J. Walker et A. Wilson. (1999). « Economic Implications of Reducing Carbon Emissions: The Oxford Model ». *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 335-365.
- Cremer H. et F. Gahvari (1995). « Uncertainty, Optimal Taxation and the Direct versus Indirect Tax Controversy ». *Economic Journal* **105** (432) : 1165-1179.
- Criqui P., S. Mima et L. Viguié (1999). « Marginal Abatement Costs of CO₂ Emission Reductions, Geographical Flexibility and Concrete Ceilings: An Assessment Using the POLES Model ». *Energy Policy* **27** (10) : 585-601.
- Criqui P. *et al.* (1996). *POLES 2.2*. Programme JOULE II, Commission européenne DG XVII – développement de la recherche scientifique. Bruxelles. 99 p.
- Criqui P. et N. Kouvaritakis (1997). « Les coûts pour le secteur énergétique de la réduction des émissions de CO₂ : une Évaluation Internationale avec le Modèle POLES ». Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie. Cahier de Recherche n°13. 20 p. <http://www.upmf-grenoble.fr/iepe/textes/Cahier13.PDF> (accès janvier 2003).
- DeCanio S. (1993). « Barriers within Firms to Energy Efficiency Investments ». *Energy Policy* **21** (9) : 901-914.
- DGII (1992). *The Economics of Limiting CO₂ Emissions*. Édition spéciale de *European Economy*. Commission des Communautés Européenne, Bureau des Publications Officielles, Luxembourg.
- Edmonds, J.A., H.M. Pitcher, D. Barns, R. Baron et M.A. Wise. (1995). « Modeling Future Greenhouse Gas Emissions: The Second Generation Model Description ». In L.R. Klein et F.C. Lo. (éds.) *Modeling Climate Change*. United Nations University Press, Tokyo.
- Eto J., E. Vine, L. Shown, R. Sonnenblick et C. Payne (1994). « The Cost and Performance of Utility Commercial Lighting Programs ». Lawrence Berkeley Laboratory. *Energy and Environment Division* LBL-34967.
- Fisher-Vanden K., J.A. Edmonds, H.M. Pitcher, D. Barns, R. Baron, S. Kim, C. MacCracken, E.L. Malone, R.D. Sands et M. Wise (1993). *The Second Generation Model of Energy Use, the Economy, and Greenhouse Gas Emissions*. Pacific Northwest Laboratory, Washington, DC. <http://sedac.ciesin.org/mva/FV1993/FV1993.html> (accès septembre 2002).

- Fortin E. (1998). *Étude des Effets Redistributifs d'une Taxe sur le Carbone et l'Énergie à l'Aide du Modèle IMACLIM*. CIRED. Document de travail. 21 p.
- Fullerton D. et G.E. Metcalf (1998). « Environmental Taxes and the Double Dividend Hypothesis: Did You Really Expect Something for Nothing? ». *Chicago-Kent Law Review* **73** (1) : 221-256.
- Gately D. (1992). « Imperfect Price-Reversibility of Oil Demand: Asymmetric Responses of US Gasoline Consumption to Price Increases and Declines ». *The Energy Journal* **13** (4) : 179-207.
- Gherzi F. (2002). « IMACLIM-POLES, Enjeux de l'articulation Bottom-up/Top-down dans la Modélisation de Politiques Climatiques ». In A. Bayar et A. Dramais (éds.) *EcoMod2002 International Conference on Policy Modeling*. Actes du colloque tenu à Bruxelles, 4-6 juillet. CD-ROM.
- Gherzi F., J.-C. Hourcade et P. Quirion (2001). « Marché International du Carbone et Double Dividende : Antinomie ou Synergie ? ». *Revue Française d'Économie* **16** (2) : 149-177.
- GIEC (1996). *Le changement climatique. Dimensions économiques et sociales*. Contribution au Deuxième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. La Documentation Française, Paris. 544 p.
- Giraud P.-N. et A. Nadaï (1994). « L'Impact Économique de l'Écotaxe. Les Effets de la Taxe Carbone-Énergie sur l'Industrie Française ». *Futuribles* (189) : 135-153.
- Godard O. (1997). « Les Permis Négociables et la Convention sur le Climat : de l'Expérience Américaine aux Enjeux de l'Harmonisation ». *Revue de l'Énergie* (491) : 606-622.
- Godard O. et O. Beaumais (1994). « Économie, Croissance et Environnement. De Nouvelles Stratégies pour de Nouvelles Relations ». *Revue Économique* **44** : 143-176. Hors Série *Perspectives et Réflexions Stratégiques à Moyen Terme*.
- Goulder L.H. (1995). « Environmental Taxation and the Double-Dividend: A Reader's Guide ». *International Tax and Public Finance* **2** (2) : 157-183.
- Goulder L.H. et S.H. Schneider (1999). « Induced Technological Change and the Attractiveness of CO₂ Abatement Policies ». *Resource And Energy Economics* **21** (3-4) : 211-253.
- Grubb M., J. Edmonds, P. ten Brink et M. Morrison (1993). « The Costs of Limiting Fossil-Fuel CO₂ Emissions : A Survey and Analysis ». *Annual Review of Energy and the Environment* **18** : 397-478.
- Grubb M., J.-C. Hourcade et S. Oberthür (2001). *Keeping Kyoto: A Study on Approaches to Maintaining the Kyoto Protocol on Climate Change*. Climate Strategies. 64 p. <http://www.climate-strategies.org/keepingkyoto.pdf> (accès janvier 2003).
- Gupta J. et M. Grubb (éds.) (2000). « Climate Change and European Leadership: A Sustainable Role for Europe? ». Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. Collection Environment & Policy **27**. 372 p.
- Ha Duong M., J.-C. Hourcade et F. Lecocq (1999). « Dynamic Consistency Problems behind the Kyoto Protocol ». *International Journal of Pollution and Environment* **11** (4) : 426-446.
- Ha Duong M., M. Grubb et J.-C. Hourcade (1997). « Influence of Socioeconomic Inertia and Uncertainty on Optimal CO₂-Emission Abatement ». *Nature* **390** : 270-273.

- Hahn R.H. et R.N. Stavins (1991). « Incentive-Based Environmental Regulations: A New Era from an Old Idea? ». *Ecology Law Quarterly* **18** (1) : 1-42.
- Haïtes E. (1997). *Implications for Canada of International Emissions Trading for Greenhouse Gases*. National Air Issues Coordinating Committee (Canada). Climate Change Working Group. Octobre.
- Harrison G.W. et B. Kriström (1999). « General Equilibrium Effects of Increasing Carbon Taxes in Sweden ». In R. Brännlund et I.-M. Gren (éds.) *Green Taxes - Economic Theory and Empirical Evidence from Scandinavia*. Edward Elgar, Cheltenham, Royaume-Uni.
- Hasset K. et G.E. Metcalf (1993). « Energy Conservation Investment. Do Consumers Discount the Future Correctly? ». *Energy Policy* **21** (6) : 710-716.
- Hélioui K. (1997). *Double Dividende d'une Écotaxe en Présence de Fluctuations Conjoncturelles et de Rigidités de l'Emploi*. CIREN. Document de travail. 24p.
- Hill M. (1999). *Green Tax Reform in Sweden: The Second Dividend and the Cost of Tax Exemptions*. The Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm. Beijer Institute of Ecological Economics. Discussion Paper 119. 43 p.
<http://www.beijer.kva.se/publications/pdf-archive/martinhillidoc.pdf> (accès janvier 2003).
- Hoel M. (1996). « Should a Carbon Tax be Differentiated across Sectors? ». *Journal of Public Economics* **59** (1) : 17-32.
- Hogan W.W. et D.W. Jorgenson (1991). « Productivity Trends and the Costs of Reducing Carbon Dioxide Emissions ». *The Energy Journal* **12** (1) : 67-85.
- Hourcade J.-C. (1990). *Les Coefficients d'Élasticité et leur Domaine de Pertinence pour la Prévision Énergétique : de l'Élasticité 'Loi' à l'Élasticité 'Mesure' des Degrés de Liberté*. Étude pour le Commissariat Général du Plan. 36 p.
- Hourcade J.-C. (coordinateur), Ben Chaabane N., Hélioui K., Journé V. et P. Mabire (1993). *Greenhouse gas abatement costing study : France 1988-2030*. Rapport pour l'UNEP. 59 p.
- Hourcade J.-C. et F. Gherzi (1998). « De Kyoto à Buenos Aires : l'Émergence d'un Nouveau Contexte pour la Compétition Industrielle ». *Revue d'Économie Industrielle* **83** (1) : 27-45.
- Hourcade J.-C. et F. Gherzi (2000). « Le Rôle du Changement Technique dans le Double Dividende d'Écotaxes ». *Économie et Prévision* (143-144) : 47-68.
- Hourcade J.-C. et F. Gherzi (2002). « The Economics of a Lost Deal: Kyoto - The Hague - Marrakech ». *The Energy Journal* **23** (3) : 1-26.
- Howarth R. et B. Anderson (1993). « Market Barriers to Energy Efficiency ». *Energy Economics* **15** (4) : 262-272.
- Howarth, R. et M. Winslow (1994). « Energy Use and Climate Stabilisation : Integrating Pricing and Regulatory Policies ». *Energy-The International Journal* **19** (9) : 855-867.
- INSEE—Institut National de la Statistique et des Études Économiques (1998). *Comptes et Indicateurs Économiques. Rapport sur les Comptes de la Nation 1997*. INSEE, Paris. 418 p.
- INSEE—Institut National de la Statistique et des Études Économiques (2001). *Comptes Nationaux. Rapport sur les Comptes de la Nation 2000*. INSEE, Paris. 45 p. + CD-ROM.

- Jacoby H.D. et I.S. Wing (1999). « Adjustment Time, Capital Malleability and Policy Cost ». *The Energy Journal* Special Issue *The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 73-92.
- Jacoby H.D., R. Prinn et R. Schmalensee (1998). « Kyoto's Unfinished Business ». *Foreign Affairs* **77** : 54-66.
- Jaffe A.B. et R.N. Stavins (1994a). « The Energy-Efficiency Gap: What Does It Mean? ». *Energy Policy* **22** (10) : 804-810.
- Jaffe A.B. et R.N. Stavins (1994b). « The Energy Paradox and the Diffusion of Conservation Technology ». *Resource and Energy Economics* **16** (2) : 91-122.
- Jensen J. (1998). *Carbon Abatement Policies with Assistance to Energy Intensive Industry*. Ministère du Commerce et de l'Industrie, Copenhagen, Danemark. Projet MobiDK. Working paper 2/98. 27 p.
<http://www.mobidk.dk/2-98-jj.pdf> (accès janvier 2003)
- Jorgenson D.W. et B. Fraumeini (1981). « Relative Prices and Technical Change ». In E.R. Berndt et B.C. Field (éds.) *Modeling and Measuring Natural Resource Substitution*. MIT Press, Cambridge MA, États-Unis.
- Jorgenson D.W. (1984). « Economic Effects of the Rise in Energy Prices: What Have We Learned in Ten Years? The Role of Energy in Productivity Growth ». *American Economic Review* **74** (2) : 26-30.
- Jorgenson D.W. (1997). Participation au séminaire *How Economics Can Inform the Climate Change Debate* organisé par l'*American Enterprise Institute for Public Policy Research*.
<http://www.aei.org/cs/cs7755.htm> (accès janvier 2003).
- Joskow P. et D. Marron (1993). « What Does a Megawatt Really Cost ? Evidence from Utility Conservation Programs. » *The Energy Journal* **13** (4) : 41-74.
- Kainuma M., Y. Matsuoka et T. Morita (1999). « Analysis of Post-Kyoto Scenarios: AIM Model ». *The Energy Journal* Special Issue *The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 207-220.
- Koomey J. et A. Samstad (1994). « Technical Evidence for Assessing the Performance of Markets Affecting Energy Efficiency. » *Energy Policy* **22** (10) : 826-832.
- Kopp R., R. Morgenstern et W. Pizer (1997). *Something for Everyone: A Climate Policy That Both Environmentalists and Industry Can Live With*. Resources for the Future. Feature **15**.
<http://www.weathervane.rff.org/features/feature015.html> (accès janvier 2002).
- Koskela R. et R. Schöb (1999). « Alleviating Unemployment : the Case for Green Tax Reforms ». *European Economic Review* **43** (9) : 1723-46.
- Krause F., E. Vine et S. Gandhi (1989). *Program Experience and its Regulatory Implications : A Case Study of Utility Lighting Efficiency Programs*. Lawrence Berkeley Laboratory. LBL-28268.
- Krause F., R. Howarth, J. Koomey et A. Samstad (1994). *Top-down and Bottom-up Methods for Calculating the Cost of Cutting Carbon Emissions : An economic assessment*. Invited contribution to the 1995 IPCC Scientific Assessment. Working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Kurosawa A., H. Yagita, Z. Weisheng, K. Tokimatsu et Y. Yanagisawa (1999). « Analysis of Carbon Emissions Stabilization Targets and Adaptation by Integrated Assessment Model ». *The Energy Journal* Special Issue *The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 157-175.

- Lecocq F., J.-C. Hourcade et M. Ha-Duong (1998). « Decision Making under Uncertainty and Inertia Constraints: Sectoral Implications of the When Flexibility ». *Energy Economics* **20** (516) : 539-55.
- Lee D.R. et W. Misiolek (1986). « Substituting Pollution Taxation for General Taxation: Some Implications for Efficiency in Pollution Taxation ». *Journal of Environmental Economics and Management* **13** : 338-347.
- Lepage C. (1998). *Étude sur l'Après Kyoto*. Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre. Rapport.
- Levine M. et R. Sonnenblick (1994). « On the Assessment of Utility Demand-Side Management Programs ». *Energy Policy* **22** (10) : 848-856.
- Locatelli B. et C. Loisel. (2002). « Changement Climatique : la Vérité est-elle au Fond du Puits ? » *Natures, Sciences et Sociétés*. Soumis. 33 p.
- Malinvaud E. et R. Guesnerie, eds. (1984). *Calcul Économique et Résorption des Déséquilibres*. Commissariat Général du Plan. La Documentation française, Paris.
- Manne A.S. et R.G. Richels (1992). *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of Carbon Dioxide Emissions Limits*. MIT Press, Cambridge MA, États-Unis. 182 p.
- Manne A.S. et R.G. Richels (1995). « MERGE - A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies ». *Energy Policy* **23** (1) : 17-34.
- Manne A.S. et R.G. Richels (1997). « On Stabilizing CO₂ Concentrations-Cost-Effective Emission Reduction Strategies ». *Environmental Modeling & Assessment* **2** (4) : 251-265.
- Manne A.S. et R.G. Richels (1999). « The Kyoto Protocol: A Cost-Effective Strategy for Meeting Environmental Objectives? » *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 1-23.
- Mathy, S., J.-C. Hourcade et C. de Gouvello (2001). « Clean Development Mechanism: Leverage for Development? » *Climate Policy* (1) : 251-68.
- McCracken C.N., J.A. Edmonds, S.H. Kim et R.D. Sands (1999). « Economics of the Kyoto Protocol ». *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 25-71.
- McKibbin W. et J. Wilcoxon (1995). « The Theoretical and Empirical Structure of the G-Cubed Model ». The Brookings Institution, Washington D.C., États-Unis. Brookings discussion paper in International Economics n°118.
<http://www.brook.edu/dybdocroot/views/papers/bdp/bdp118/bdp118.pdf> (accès septembre 2002).
- McKibbin, W.J., R. Shackelton et P.J. Wilcoxon (1998). *The Potential Effects of International Carbon Emissions Permit Trading under the Kyoto Protocol*. OECD Workshop on the Economic Modelling of Climate Change, chap. 4. OCDE, Paris. 31 p.
<http://www.oecd.org/dev/news/Environment/Chap4.pdf> (accès novembre 2001).
- McKibbin W.J., M. Ross, R. Shackelton et P.J. Wilcoxon (1999). « Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol ». *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 257-333.
- Metz B., Davidson O., Swart R. et J. Pan (éds.) (2001). *Climate Change 2001: Mitigation*. Contribution du Groupe de Travail III au troisième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'expert sur l'Évolution du Climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. 752 p.

- Metz B. et J. Gupta (éds.) (2001). « From Kyoto to The Hague: European Perspectives on Making the Kyoto Protocol Work ». *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics Special Issue* **1** (2) : 1-304.
- MIES—Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (2000). *Programme national de lutte contre le changement climatique 2000-2010*. La Documentation française, Paris. 215 p.
- Morsel H. (1996). *Histoire de l'Électricité en France. Tome troisième 1946-1987*. Ouvrage collectif sous la direction de H. Morsel. Fayard, Paris. 1196 p.
- Müller B. et U. Bartsch (2000). *Fossil Fuels in a Changing Climate: Impacts of the Kyoto Protocol and Developing Country Participation*. Oxford Institute for Energy Studies. Oxford University Press, Oxford, Royaume-Uni. 384 p.
- Nadel S. (1992). « Utility Demand-Side Management Experience and Potential – A Critical Review ». *Annual Review of Energy and the Environment* **17** : 507-535.
- Newman P. et J. Kenworthy (1989). *Cities and Automobile Dependence : An International Sourcebook*. Gower Technical, Aldershot, Royaume-Uni. 388 p.
- Nordhaus W.D. et J.G. Boyer (1999a). « Requiem for Kyoto: An Economic Analysis ». *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 93-130.
- Nordhaus W.D. et J.G. Boyer (1999b). *Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming*. Édition Internet du Warming the World Economics Models of Global Warming. MIT Press, Cambridge MA, États-Unis.
<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dicemodels.htm> (accès octobre 2000).
- Norsworthy J.R. (1983). « Energy Prices, Technical Change, and Productivity Growth ». In Schurr S., S. Stoneblum et D. Wood (éds) *Energy, Productivity, and Economic Growth* : 155-177. A Workshop sponsored by the Electric Power Research Institute, Oegeschlager, Gunn and Hainn, Cambridge MA, États-Unis.
- OCDE—Organisation pour la Coopération et le Développement Économique (1993). *Les Instruments Économiques Internationaux et le Changement Climatique*. Éditions de l'OCDE, Paris. 44 p.
- O'Donoghue C. (1997). *Carbon Dioxide, Energy Taxes and Household Income*. Economic and Social Research Institute, Dublin. Working paper 90.
- Parry I.W.H., R.C. Williams III et L.H. Goulder (1997). *When Can Carbon Abatement Policies Increase Welfare? The Fundamental Role of Distorted Factor Markets*. Resources for the Future. Discussion Paper 97-18. 37 p.
http://www.rff.org/CFDOCS/disc_papers/PDF_files/9718.pdf (accès septembre 2002).
- Pearce D.W. (1991). « The Role of Carbon Taxes in Adjusting to Global Warming ». *The Economic Journal* **101** (407) : 938-948.
- Peters I. (1996). « The role of technical progress in economic models of environmental policy ». In O. Hohmeyer, R.L. Ottinger, K. Rennings (éds.) *Social Costs and Sustainability. Valuation and Implementation in the Energy and Transport Sectors*. Springer Verlag, Berlin.
- Pezzey J. (1992). « The Symmetry between Controlling Pollution by Price and Controlling It by Quantity ». *Canadian Journal of Economics* **25** (4) : 983-91.
- Piketty T. (1997). *L'Économie des Inégalités*. Collection Repères n°216. 122 p. La Découverte, Paris.

- Poterba J.M. (1991). « Tax Policy to Combat Global Warming: On Designing a Carbon Tax ». In R. Dornbush et J.M. Poterba (éds.) *Global Warming: Economic Policy Responses* : 72-98. M.I.T. Press, Cambridge MA, États-Unis.
- Quirion P. (2002). *Can Europe afford non-global CO2 emission trading? The iron and steel industry case*. Communication au colloque *Global Trading* organisé par le réseau CATEP. Kiel, 30 septembre - 1er octobre 2002.
http://www.centre-cired.fr/perso/quirion/quirion_catep_3.PDF (accès janvier 2003).
- Renström T.I. et L. Marsiliani (1997). *Imperfect Competition, Labour Market Distortions and the Double Dividend Hypothesis*. University of Birmingham. Department of Economics Discussion Paper 97-26.
- Rosenwald F. (2001). « L'Impact des Conditions Financières sur la Décision d'Investissement ». *Économie et statistique* (341-42) : 15-28.
- Schillo B., L. Giannarelli, D. Kelly, S. Swanson et P.J. Wilcoxon (1993). *The Distributional Impacts of a Carbon Tax*. Stanford University. Energy Modeling Forum. Working Paper 12.9.
- Schipper L. et R. Howarth (1990). « United States energy use from 1973 to 1987 : The impacts of improved efficiency ». *Annual Review of Energy and the Environment* **15** : 455-504.
- Schneider S.H. et L.H. Goulder (1997). « Achieving Low-Cost Emissions Targets ». *Nature* (389) : 13-14.
- Selvanathan E. et S. Selvanathan (1994). « The Demand for Transport and Communications in the United Kingdom and Australia ». *Transportation Research B* **28B** (1) : 1-9.
- Shackleton et al. (1992). *The Efficiency Value of Carbon Tax Revenues*. Stanford University. Energy Modeling Forum. Working Paper 128.
- Sonneborn C. L. (1999). « An Overview of Greenhouse Gas Emissions Trading Pilot Schemes and Activities ». *Ecological Economics* **31** (1) : 1-10.
- Stavins R.N. (1999). « The Cost of Carbon Sequestration: A Revealed-Preference Approach ». *American Economic Review* **89** (4) : 994-1009.
- Sutherland R. (1991). « Market Barriers to Energy Efficient Investments ». *The Energy Journal* **12** (3) : 15-34.
- Symons E., J. Proops et P. Gay (1994). « Carbon Taxes, Consumer Demand and Carbon Dioxide Emissions: A Simulation Analysis for the UK ». *Fiscal Studies* **15** (2) : 19-43.
- Terkla D. (1984). « The Efficiency Value of Effluent Tax Revenues ». *Journal of Environmental Economics and Management* **11** : 107-123.
- Toman M. (1998). *Research Frontiers in the Economics of Climate Change*. Resources for the Future. Discussion Paper 98-32. 24p.
http://www.rff.org/CFDOCS/disc_papers/PDF_files/9832.pdf (accès janvier 2003).
- Train K. (1985). « Discount Rates in Consumers' Energy-Related Decisions: a Review of the Literature ». *Energy* **10** (12) : 1243-1253.
- Tullock G. (1967). « Excess Benefit ». *Water Resources Research* **3** (2) : 643-645.
- Tulpulé V., S. Brown, J. Lim, C. Polidano, H. Pant et B.S. Fisher (1999). « The Kyoto Protocol: An Economic Analysis Using GTEM ». *The Energy Journal Special Issue The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation* : 257-285.

- UNFCCC—United Nations Framework Convention on Climate Change (1997). *The Kyoto Protocol to the Convention on Climate Change*. 24 p.
<http://www.unfccc.de/resource/docs/cop3/107a01.pdf> (accès janvier 2003).
- UNFCCC—United Nations Framework Convention on Climate Change (2001). *Report of the Conference Of the Parties on the First Part of its Sixth Session, Held at The Hague from 13 to 25 November 2000*. <http://www.unfccc.int/resource/docs/cop6/05a02.htm> (accès janvier 2002)
- Victor, D.G. (2001). *The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming*. Princeton University Press, Princeton NJ, États-Unis. 178 p.
- Weitzman M. (1974). « Prices vs. Quantities ». *Review of Economic Studies* **41** (4) : 447-91.
- Weyant J. P. et J. Hill (1999). « Introduction and Overview ». *The Energy Journal* Special Issue *The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation*.
- Williams R. (1987). « Materials, affluence and energy use ». *Annual Review of Energy and the Environment* **12** : 99-144.
- Yang Z., R.S. Eckaus, A.D. Ellerman et H.D. Jacoby (1996). *The MIT Emissions Predictions and Policy Analysis (EPPA) Model*. MIT Joint Program on the Science of Global Change Report 6.
- Yu Z. (2001). *A Strategic Trade and Environmental Policy Argument for the Kyoto Protocol*. Communication à la conférence de la European Association of Environmental and Resource Economics. Southampton, Royaume-Uni.

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAP I	
THE ECONOMICS OF A LOST DEAL: KYOTO-THE HAGUE-MARRAKECH.....	7
INTRODUCTION	9
I. CONCEPTUAL AMBIGUITIES BEHIND THE NEGOTIATIONS	11
<i>I.1. The main dividing line: compliance costs and supplementarity</i>	11
<i>I.2. Private and social costs: the overlooked distinction</i>	14
<i>I.3. Paradoxes regarding compliance systems</i>	15
<i>I.4. The real terms of the supplementarity problem</i>	16
II. ANNEX B COMPROMISE SPACE <i>WITHOUT</i> EXTENDED ACTIVITIES UNDER ARTICLE 3.4	18
<i>II.1. Supplementarity and compliance costs under Candide conduct</i>	19
<i>II.2. Supplementarity and compliance costs under realistic behavior</i>	21
II.2.1. Ineffective supplementarity tools	21
II.2.2. The supplementarity effect of restoration payments	21
<i>II.3. Environmental assessment of compromise packages</i>	23
III. ANNEX B COMPROMISE SPACE <i>WITH</i> SEQUESTRATION UNDER ARTICLE 3.4	26
<i>III.1. Effect on environmental integrity and supplementarity</i>	27
<i>III.2. Effects on costs uncertainty</i>	29
IV. EFFECTS ON DEVELOPING COUNTRIES	30
V. FROM A LOST DEAL TO AN INCOMPLETE DEAL	31
CONCLUSION: THE NARROW PATHWAY TO A RECOVERED DEAL?	33
CHAP II	
DOUBLE DIVIDENDE : UNE CONTROVERSE MACROÉCONOMIQUE	37

INTRODUCTION : PROPOS D'ÉTAPE	39
I. ÉLÉMENTS DE CONSENSUS THÉORIQUE	39
II. QUELLE AMPLEUR POUR LE SECOND DIVIDENDE ?	42
III. STRUCTURE DE PRODUCTION ET EFFET PRIX : ANALYSE D'UN MODÈLE SIMPLE	45
III.1. Taxe recyclée dans un transfert forfaitaire	47
III.2. Taxe recyclée dans une baisse des charges sur le travail	48
III.2.1. À prélèvements fixes	49
III.2.2. À prélèvements proportionnels	50
III.3. Éléments d'analyse à technologie variable	55
III.3.1. À prélèvements fixes	55
III.3.2. À prélèvements proportionnels	57
CONCLUSION	60
CHAP III	
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES ET SIGNAUX PRIX	
UNE CONTROVERSE TECHNIQUE.....	61
INTRODUCTION	63
I. BOTTOM-UP VS TOP-DOWN :	
SIGNIFICATIONS D'UNE CONTROVERSE	64
II. OPTIMISME TECHNOLOGIQUE	
CONTRE PESSIMISME ÉCONOMIQUE	65
II.1. Critique de « l'efficiency gap »	67
II.2. Limites de la réponse des modèles top-down	69
II.3. Vers une conciliation des deux approches ?	72
III. AU CŒUR DE LA CONTROVERSE :	
LE CHANGEMENT TECHNIQUE INDUIT	74
IV. INERTIE DES SYSTÈMES TECHNIQUES	
ET DES STRUCTURES DE CONSOMMATION	76
V. MODES DE DÉVELOPPEMENT SOCIO-ÉCONOMIQUES ACTUELS	
ET FUTURS ET INCERTITUDES SUR LES COÛTS	77
V.1. Déterminants des trajectoires de développement	78
V.2. Enjeux liés à la multiplicité des scénarios de référence	80
CONCLUSION	82

CHAP IV	
LE MODÈLE IMACLIM.....	85
INTRODUCTION	87
I. SCHÉMA DIRECTEUR	88
II. STATIQUE COMPARATIVE À L'HORIZON DE PROJECTION	90
II.1. Principe général	90
II.1.1. Prix de production des biens	91
II.1.2. Demande des ménages	93
II.1.3. Demandes de facteurs	94
II.1.4. Équilibre emplois-ressources en volume	95
II.1.5. Neutralité budgétaire et recyclage	95
II.2. Mécanique du réquilibrage	98
II.3. Traits saillants	99
II.3.1. Refus du paradigme d'une croissance « en âge d'or »	99
II.3.2. Endogénéisation du progrès technique induit	100
II.3.3. Représentation des saturations de l'efficacité dynamique des signaux prix	100
CONCLUSION	101
CHAP V	
IMACLIM POLES : ILLUSTRATION DES ENJEUX DE L'ARTICULATION <i>TOP-DOWN/BOTTOM-UP</i>	103
INTRODUCTION	105
I. LE MODÈLE POLES	105
II. FONCTIONS USUELLES/FORMES SPÉCIFIQUES : DEGRÉS DE LIBERTÉ DANS LE CALIBRAGE	107
II.1. Production d'énergie transformée E	108
II.2. Production de bien composite Q	109
II.2.1. Fonctions usuelles : <i>Constant Elasticity of Substitution</i>	109
II.2.2. Forme spécifique : souplesse des élasticités variables	112
II.3. Consommation des ménages	114
II.3.1. Formes usuelles : CES et système linéaire de dépenses	114
II.3.2. Forme spécifique	118
III. QUALITÉS RESPECTIVES DES AJUSTEMENTS	118
IV. CONSÉQUENCES SUR L'ÉVALUATION DE POLITIQUES CLIMATIQUES	121

IV.1. Portée du choix forme spécifique/fonction usuelle	122
IV.2. Comparaison des résultats en équilibre partiel et général	124
CONCLUSION	128
CHAP VI	
DOUBLE DIVIDENDE : LE RÔLE DU CHANGEMENT TECHNIQUE	131
INTRODUCTION	133
I. DÉTERMINANTS DU DEUXIÈME DIVIDENDE HORS PROGRÈS TECHNIQUE INDUIT	133
I.1. Tests 1 à 4 : technologie fixée	135
I.2. Tests 5 à 8 : impact des adaptations dans la production et la consommation	137
II. INTRODUCTION DU PROGRÈS TECHNIQUE INDUIT ET ÉVALUATION DU DOMAINE DE VALIDITÉ D'UN DOUBLE DIVIDENDE « FORT »	139
CONCLUSION : UN AGENDA DE RECHERCHE POUR LE FUTUR	144
CHAP VII	
POLITIQUES CLIMATIQUES ET DISTORSIONS DE CONCURRENCE	147
INTRODUCTION	149
I. DISTORSIONS DE CONCURRENCE DE L'ÉQUILIBRE PARTIEL À L'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL	151
I.1.1. Équilibre partiel sans prise en compte du recyclage	152
I.1.2. Équilibre partiel avec recyclage direct	154
I.1.3. Équilibre général, avec adaptation, taxation des entreprises uniquement	154
I.1.4. Équilibre général, taxation étendue aux ménages	155
II. DEGRÉS DE LIBERTÉ DANS LA DÉFINITION DE POLITIQUES CLIMATIQUES DOMESTIQUES	157
II.1. Niveau d'application de la contrainte	157
II.2. Attribution initiale des droits d'émission	158
II.3. Champs d'accès des entités privées au marché international	159
III. ÉVALUATION EN ÉQUILIBRE GÉNÉRAL DE 6 VARIANTES DE POLITIQUES DOMESTIQUES	159
III.1. Définition des six variantes	160

III.2. Variantes A et B : insuffisance de la flexibilité internationale	162
III.3. Variantes C et D : existence d'un potentiel de double dividende	163
III.4. Variantes E et F : deuxième dividende et rétrécissement de la base fiscale	165
CONCLUSION	166
CHAP VIII	
IMPACT DES STRUCTURES DE PRODUCTION : SIMULATIONS SUR 8 ÉCONOMIES	169
INTRODUCTION	171
I. RÉSULTATS DES SCÉNARIOS	172
II. COMPARAISON DES ÉQUILIBRES SECTORIEL ET GÉNÉRAL : RÉSULTATS TRANSVERSAUX	176
II.1. Comparaison des coûts marginaux	176
II.2. Comparaison des coûts totaux	178
III. RÉSULTATS PAR ZONE	178
III.1. Union Européenne, États-Unis, Japon, Canada et Océanie	180
III.2. Ancienne URSS	181
III.3. Chine	182
III.4. Inde et Brésil	183
CONCLUSION	183
CONCLUSION GÉNÉRALE	187
ANNEXES	193
ANNEXE I.1	
SAP 12 TECHNICAL DESCRIPTION	195
I RECONSTRUCTION OF THE ANNEX II MACCS	195
II ECONOMIES IN TRANSITION / REST OF THE WORLD ABATEMENT POTENTIALS	198
II.1 EIT	198
II.2 RoW	199
III RESTRICTION OF THE GLOBAL TRADING CASE: THE CDM SCENARIO	200
ANNEXE I.2	
ADDITIONAL TABLES	202

ANNEXE IV.1	
ÉQUATIONS D'IMACLIM	203
I. NOMENCLATURE	203
I.1. Variables	204
I.2. Paramètres endogènes (soumis au calibrage, ne varient pas avec la contrainte carbone)	207
I.3. Paramètres et variables exogènes, définition et origine	208
II. FORMULAIRE	212
II.1. Prix des biens	212
II.2. Consommations	213
II.3. Consommations unitaires	214
II.4. Travail	215
II.5. Revenus	215
II.6. Prélèvements	216
II.7. Autres	217
II.8. Commentaires	217
III. SPÉCIFICATIONS PARTICULIÈRES	222
III.1. Définition et paramétrage du progrès technique endogène Φ	222
III.2. Définition et paramétrage des rendements décroissants Θ	228
III.3. Reconstitution de l'investissement économiseur d'énergie en 2030	230
IV. SPÉCIFICATIONS CONSTRUITES SUR LES RÉSULTATS DE POLES	233
V. RECONSTITUTION DE L'INVESTISSEMENT ÉLECTRIQUE PRODUCTIF EN 2030	238
ANNEXE IV.2	
FRANCE 2030, 3 SECTEURS :	
CONSTITUTION DE L'ÉQUILIBRE DE RÉFÉRENCE	240
I. CONSTRUCTION D'UN TES À TROIS BIENS	240
I.1. Consommations intermédiaires	241
I.2. Partage de la valeur ajoutée (VA)	241
I.3. Ressources en produits	242
I.4. Emplois	243
I.5. Correction du produit FG2, ré-agrégation de FG1 et FG2 et extraction d'un produit fossile F	244
II. PROJECTION DU TES VERS 2030	248

<i>II.1. Définition des variables</i>	248
<i>II.2. Affectation des valeurs 1998</i>	250
<i>II.3. Hypothèses de projection</i>	251
III. DONNÉES MACROÉCONOMIQUES COMPLÉMENTAIRES PROJETÉES	256
IV. ÉTAT INITIAL DES VARIABLES	259
V. CALIBRAGE DES PARAMÈTRES ENDOGÈNES	264
ANNEXE VI.1 RÉSULTATS DES TESTS ET SCÉNARIOS	265
BIBLIOGRAPHIE	271
TABLE DES MATIÈRES	283

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur l'évaluation des coûts macro-économiques de politiques climatiques nationales et mondiales.

Ils reposent sur une mise en relation innovante des perspectives énergétique et macroéconomique, dont l'objectif est d'assurer la représentation fidèle, dans la modélisation macroéconomique, des élasticités du système énergétique mises en lumière par l'analyse technico-économique.

Ils opèrent aussi un questionnement critique des études analytiques ayant conclu à l'improbabilité d'un dividende économique net de réformes fiscales environnementales, en démontrant que le signe ultime de l'effet prix général d'une réforme « écofiscale » est dépendant des structures de production et de consommation préexistant à la réforme, ainsi que de leur réactivité au signal-prix.

Ils soulignent enfin le rôle prépondérant du changement technique induit et de ses modalités—éviction de l'investissement de productivité générale éventuellement corrigée par une diffusion du progrès technique spécifique—sur l'obtention d'un second dividende.

Titre anglais

Technical change and the double dividend

**A tentative confluence of
the energy and macro-economic forecasting**

Résumé anglais

This PhD thesis is devoted to the evaluation of the macro-economic costs of national and global climate policies.

It is primarily built on an innovative articulation of the energy and macro-economic forecasting, insisting on the precise reproduction of the elasticities revealed by the techno-economic modeling of energy systems in a macro-economic framework.

It also questions the analytical results putting in doubt the hypothesis of a double dividend, by demonstrating that the ultimate deflationist or inflationist nature of an "ecofiscal" reform depends on the pre-existing production and consumption structures, and on their reactivity to the price-signal.

At last, it underlines the predominant role of induced technical change and its particulars—crowding-out of general productivity investment, tempered by possible spillovers from the energy-oriented technical progress—on obtaining a second dividend.

Spécialité doctorale

Analyse et Politique Économiques.

Mots clés

Politiques climatiques, MEGC, double dividende, changement technique, articulation *bottom-up/top-down*

Thèse réalisée au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), UMR CNRS 8568.